

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS Fundada en 1551

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

Análisis de la sismicidad asociada al proceso de subducción en el Sur del Perú.

TESIS para optar el Título Profesional de: INGENIERO GEÓLOGO

AUTOR:

YOLANDA ISABEL ZAMUDIO DÍAZ

LIMA-PERÚ 2003

RESUMEN

El análisis de la sismicidad asociada al proceso de subducción, en el Sur del Perú, se basa en el catálogo de Engdahl et al. (1998) para el periodo comprendido entre los años 1964 y 1995. Se seleccionaron 490 sismos ocurridos en la región, con profundidades variando entre 0 y 250 km, y con magnitudes $m_b \geq 4,0$.

Los objetivos de este trabajo son, relacionar las características tectónicas de la región con la actividad sísmica, evaluar el peligro sísmico, y determinar los períodos de retorno para sismos de magnitud $m_b \geq 5,5$.

Fueron determinadas 2 fuentes sismogénicas, una considerando sismos hasta de 100 km de profundidad (Fuente sismogénica 1) y otra con profundidades entre 90 y 250 km (Fuente sismogénica 2). Para cada fuente se hizo un análisis estadístico con la distribución frecuencia – magnitud de Gutenberg- Richter, máxima verosimilitud y valores extremos. Fueron establecidas relaciones de recurrencia para cada fuente sismogénica mostrando un periodo de retorno de 300 años en la fuente sismogénica 1 para sismos con $6.9 m_b$ ($M_w \approx 8,7$) que es la magnitud máxima prevista para esta fuente.

ABSTRACT

The analysis of the seismicity associated to the subduction process, southern Peru, is based on the catalogue of Engdahl et al. (1998), for the period between years 1964 and 1995. We selected 490 earthquakes that occurred in this region, with depths between 0 and 250 kilometer, and $m_b \geq 4,0$ magnitudes.

The goals of this work are, to connect the tectonic features with the seismic activity, to evaluate the seismic hazard, and to determine the periods of return for earthquake's magnitude $m_b \geq 6,5$.

Two seismogenic sources were determined, one considering earthquakes until of 100 km of depth (seismogenic source 1) and another one with depths between 90 and 250 km (seismogenic source 2). For each source became a statistical analysis with Gutenberg- Richter relation, maximum likelihood and extreme values. Relations of recurrence for each seismogenic source were established showing a period of return around 300 years in seismogenic source 1 for earthquakes with $6.9 m_b$ ($M_w \approx 8,7$).

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Instituto Geofísico del Perú en la persona del Dr. Hernán Montes, Director Técnico, en esta institución comencé mi vida profesional y adquirí mucho de los conocimientos en Geofísica.

Al Dr. Jesús Berrocal Gómez, profesor titular de la Universidad de Sao Paulo que me orientó de manera amable y desinteresada en gran parte de este trabajo.

Al Ingeniero Oscar Palacios Moncayo que en todo momento me alentó a culminar y lograr el título profesional.

Un agradecimiento eterno, a mi familia que me apoyó durante toda mi formación académica, a los amigos y profesores de la escuela de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a los compañeros del Instituto Geofísico del Perú. A todos aquellos que de una manera u otra compartieron conmigo y a los cuales no voy a mencionar pero que siempre tendré presente.

INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

	Pág.
Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio	4
Figura 2. Mapa de vías de comunicación e hidrografía	5
Figura 3. Mapa de clasificación climática	6
Figura 4. Estructura interna de la Tierra	11
Figura 5. Las placas tectónicas a nivel mundial	12
Figura 6. Procesos tectónicos y límites de placa	13
Figura 7. Unidades Morfoestructurales	14
Figura 8. Movimiento de partículas para las ondas longitudinales y transversales	20
Figura 9. Movimiento de partículas para las ondas Love y Rayleigh	21
Figura 10. Ejemplos de un sismograma mostrando algunos eventos sísmicos y sus respectivas fases.	22
Figura 11. Propagación de ondas sísmicas	23
Figura 12. Parámetros sísmicos	24
Figura 13. Distribución epicentral de los sismos ocurridos en el área de estudio entre los años 1964 y 1995	34
Figura 14. Secciones sísmicas donde se puede observar la geometría de la ZWB	35
Figura 15. Fuentes sismogénicas delimitadas para el área de estudio	36
Figura 16a. Distribución temporal en la fuente sismogénica 1	37
Figura 16b. Distribución temporal en la fuente sismogénica 2	37
Figura 17a. Relación frecuencia-magnitud y de valores extremos para la fuente sismogénica 1	38
Figura 17b. Relación frecuencia-magnitud y de valores extremos para la fuente sismogénica 2	38
Figura 18. Curvas de periodo de retorno para cada fuente sismogénica	45
Tabla 1. Escala de intensidad sísmica Mercalli Modificada	25
Tabla 2. Ecuaciones determinadas utilizando los métodos estadísticos respectivos para cada fuente sismogénica	39

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE FIGURAS	iv
Capítulo 1. GENERALIDADES	1
1.1 Objetivos.	1
1.2 Ubicación de la zona de estudio	1
1.3 Accesibilidad	1
1.4 Hidrografía	2
1.5 Clima y vegetación	2
Capítulo 2. TECTONICA	7
2.1 Características tectónicas globales	7
2.1.1 Limites convergentes o destructivos	8
2.1.2 Limites divergentes o constructivos	8
2.1.3 Limites conservativos o fallas transformantes	8
2.2 Marco tectónico en el Perú	8
2.2.1 Dorsal de Nazca	9
2.2.2 Fosa peruano-chilena	9
2.2.3 Cordillera de los Andes	9
2.3 Actividad Volcánica	10
Capítulo 3. FUNDAMENTO TEORICO	15
3.1 Ondas internas	15
3.1.1 Onda P	15
3.1.2 Onda S	16
3.2 Ondas superficiales	17
3.2.1 Onda Love	17
3.2.2 Onda Rayleigh	17
3.3 Parámetros focales de los sismos	17
3.4 Magnitud	17
3.5 Intensidad Sísmica	17

Capítulo 4. EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO	26
4.1 Catálogos sísmicos	26
4.1.1 Catálogos de sismos históricos	26
4.1.2 Catalogo sísmico de datos instrumentales	27
4.2 Completitud del catalogo sísmico	27
4.3 Análisis estadístico de la sismicidad	28
4.3.1 Método de Gutenberg y Richter	28
4.3.2 Método de máxima verosimilitud	28
4.3.3 Método de valores extremos	29
4.3.4 Probabilidad de ocurrencia	29
Capítulo 5. SISMICIDAD EN EL SUR DEL PERU	30
5.1 Elección del catalogo sísmico para el sur del Perú	30
5.2 Evaluación de la completitud del catalogo sísmico	31
5.3 Análisis espacial de la sismicidad	31
5.3.1 Distribución epicentral	31
5.3.2 Secciones sísmicas	32
5.4 Fuentes sismogénicas	32
5.4.1 Delimitación de fuentes sismogénicas	32
5.4.2 Características de las fuentes sismogénicas	32
Capítulo 6. RESULTADOS	40
6.1 Evaluación del catalogo sísmico	40
6.1.1 Análisis temporal	40
6.1.2 Análisis espacial	40
6.2 Fuentes sismogénicas	41
6.3 Parámetro b	41
6.4 Periodos de retorno	42
6.5 Probabilidad de ocurrencia	42
Capítulo 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	45
ANEXO 1. Listado de sismos utilizados	49
ANEXO 2. Sismos históricos	62
ANEXO 3. Datos utilizados en los gráficos de Gutenberg-Richter y Valores Extremos	65

Capítulo 1

GENERALIDADES

1.1 OBJETIVOS

Este informe técnico tiene como objetivos:

- a) Analizar la actividad sísmica en el sur del Perú asociada al proceso de subducción.
- b) Evaluar el peligro sísmico y determinar los periodos de recurrencia de los sismos de magnitud mayor a 6,0 m_b .
- c) Obtener con este aporte el título profesional de Ingeniero Geólogo.

1.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio está comprendido entre las coordenadas geográficas 13° - 18.5° de latitud Sur y 68° - 78° de longitud Oeste, abarcando parcialmente los departamentos de Lima, Huancavelica, Ayacucho, Cusco, Madre de Dios, y totalmente los departamentos de Ica, Arequipa, Puno, Apurímac, Moquegua y Tacna (Fig. 1).

1.3 ACCESIBILIDAD

Desde Lima se puede llegar a la zona de estudio mediante vía terrestre y vía aérea (Fig. 2). El transporte terrestre utiliza la carretera Panamericana Sur desde donde se puede acceder a diversas vías de penetración hacia las ciudades que abarcan el área de estudio. El transporte aéreo permite llegar desde la ciudad de Lima a las ciudades de Cusco, Puno, Arequipa y Tacna.

1.4 HIDROGRAFÍA

Los principales ríos de la vertiente del mar peruano se desplazan desde la cordillera Occidental hasta el Océano Pacífico (Fig. 2). La región de este estudio comprende varias cuencas hidrográficas que desembocan en el Océano Pacífico como por ejemplo la cuenca del río Pisco, río Ica, río Acari, río Chaparra, río Ocoña, río Majes, río Sihuas, río Tambo, río Moquegua, río Locumba, río Sama y río Caplina.

La mayoría de estos ríos presentan fuertes crecidas estacionales durante el verano, algunos presentan un régimen irregular como el río Ica. Los ríos de Ocoña, Camaná y Tambo presentan un caudal muy alto durante todo el año pero crecen considerablemente entre los meses de diciembre a marzo.

1.5 CLIMA Y VEGETACIÓN

El área de estudio comprende altitudes que van desde los 0 hasta los 6768 metros sobre el nivel del mar, las características geográficas determinan en el Perú distintos climas (Fig. 3) que han sido clasificados por W. Köppen de la siguiente manera:

1.5.0 Aw (Clima de sabana periódicamente sin lluvias)

La clasificación corresponde a un clima tropical, un clima de selva donde periódicamente son ausentes las lluvias. Esto indica que en periodo seco bien pronunciado causa un impedimento en el crecimiento de vegetación.

1.5.1 Bw (Clima de sabana, clima tropical periódicamente húmedo)

Se distingue por presentar un clima seco, sin lluvias. Es en esta zona en los oasis, donde se han establecido centros de irrigación altamente desarrollados donde se cultiva maíz, arroz, pan llevar, frutas y las plantas forrajeras.

1.5.2 BSw (Clima de estepa con escasas precipitaciones)

Es una zona de clima seco, se presenta como una zona de poca extensión. En pocos casos permite una utilización agraria modesta en esas zonas.

1.5.3 BSs (Clima de estepa con escasas precipitaciones)

BSs se presenta en las áreas de los oasis de neblinas (lomas), es un área de estepa con lluvias durante el invierno. Estas lomas son los únicos centros localmente limitados donde hay lluvias invernales. Solamente algunas lomas especialmente favorecidas son utilizadas para el cultivo de plantas como por ejemplo las lomas de Chala (Atiquipa).

1.5.4 Dwb (Clima frío o boreal con precipitaciones en verano)

Corresponde al clima frío seco en invierno, donde por lo menos cuatro meses al año se registra un promedio de temperatura de 10° y con un periodo de sequía bien marcado. La agricultura es con fines de uso doméstico y se siembra el maíz, papa y otros tubérculos además de la quinua. La crianza de llamas y alpacas encuentra óptimas condiciones en esta zona.

1.5.5 ETH y EFH (climas fríos de tundra y nieves perpetuas de alta montaña)

Para el clima de tundra ETH se conoce una temperatura media del mes más cálido mayor a 0°, esta temperatura en un clima de nieve perpetua sin vegetación, ETH no debe superar en ningún caso el punto de congelación. Este clima se presenta en las zonas de mayor altitud geográfica.

Económicamente el clima EFH y las posiciones más altas del clima son importantes ya que la formación de lagunas, pantanos y glaciares influyen como un factor de almacenamiento de agua y regulador del caudal, constituyendo además un factor económico de irrigación y energía de las regiones desérticas costaneras.

1.5.6 Cw (Clima húmedo con precipitaciones en verano)

Esta zona se extiende principalmente en las vertientes orientales de los Andes. Las oscilaciones de temperatura van desde 3° hasta 18°, las precipitaciones en el mes más húmedo superan 10 veces las lluvias del mes más seco. En el sur del Perú (a partir de los 10° de latitud sur) las lluvias caen en el periodo de verano.

Desde el punto de vista agrícola esta región climática tiene gran importancia sobretodo en las altitudes bajas que es apta para cultivos de café, té, frutales, maíz, plátanos y caña de azúcar.

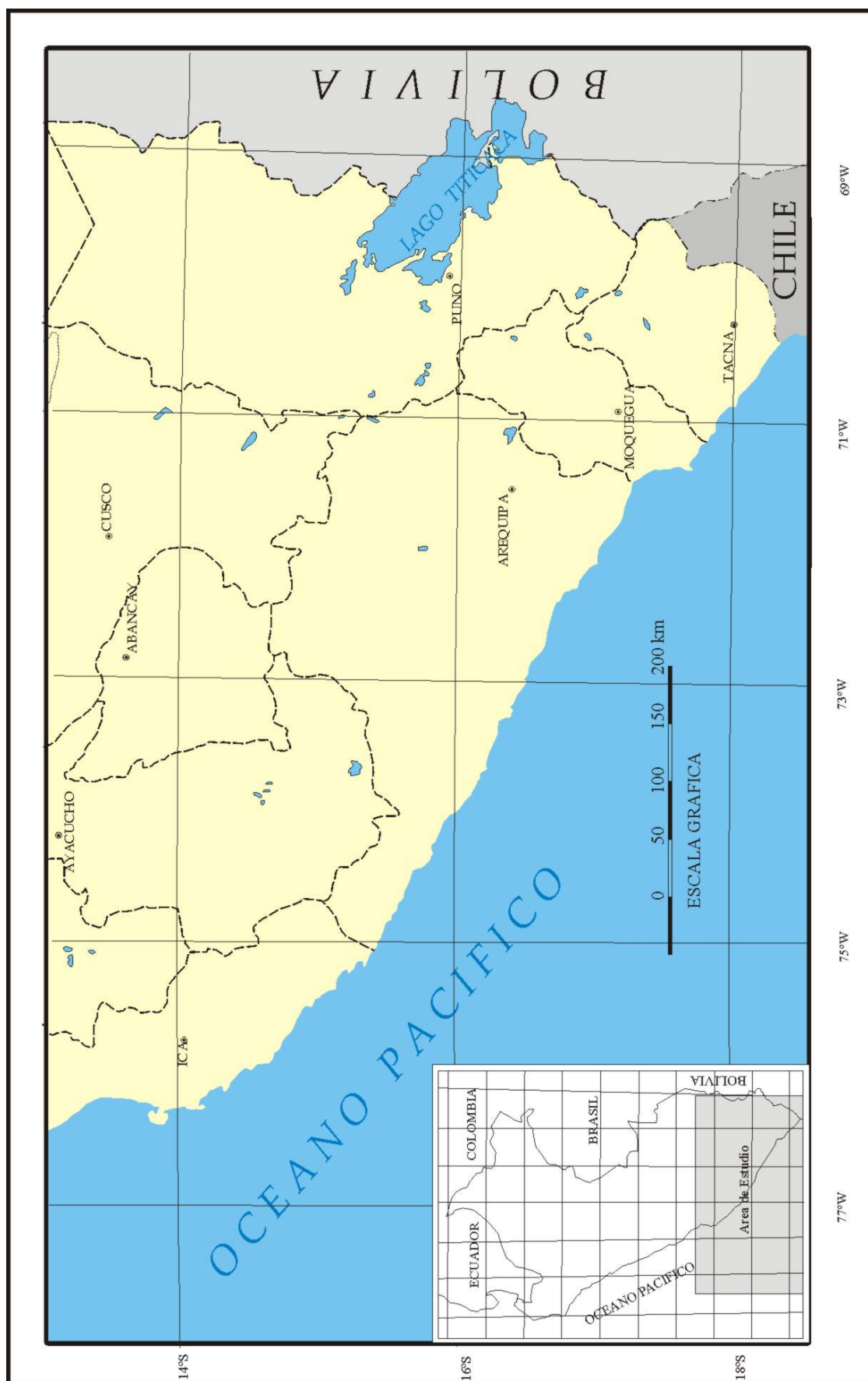


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio

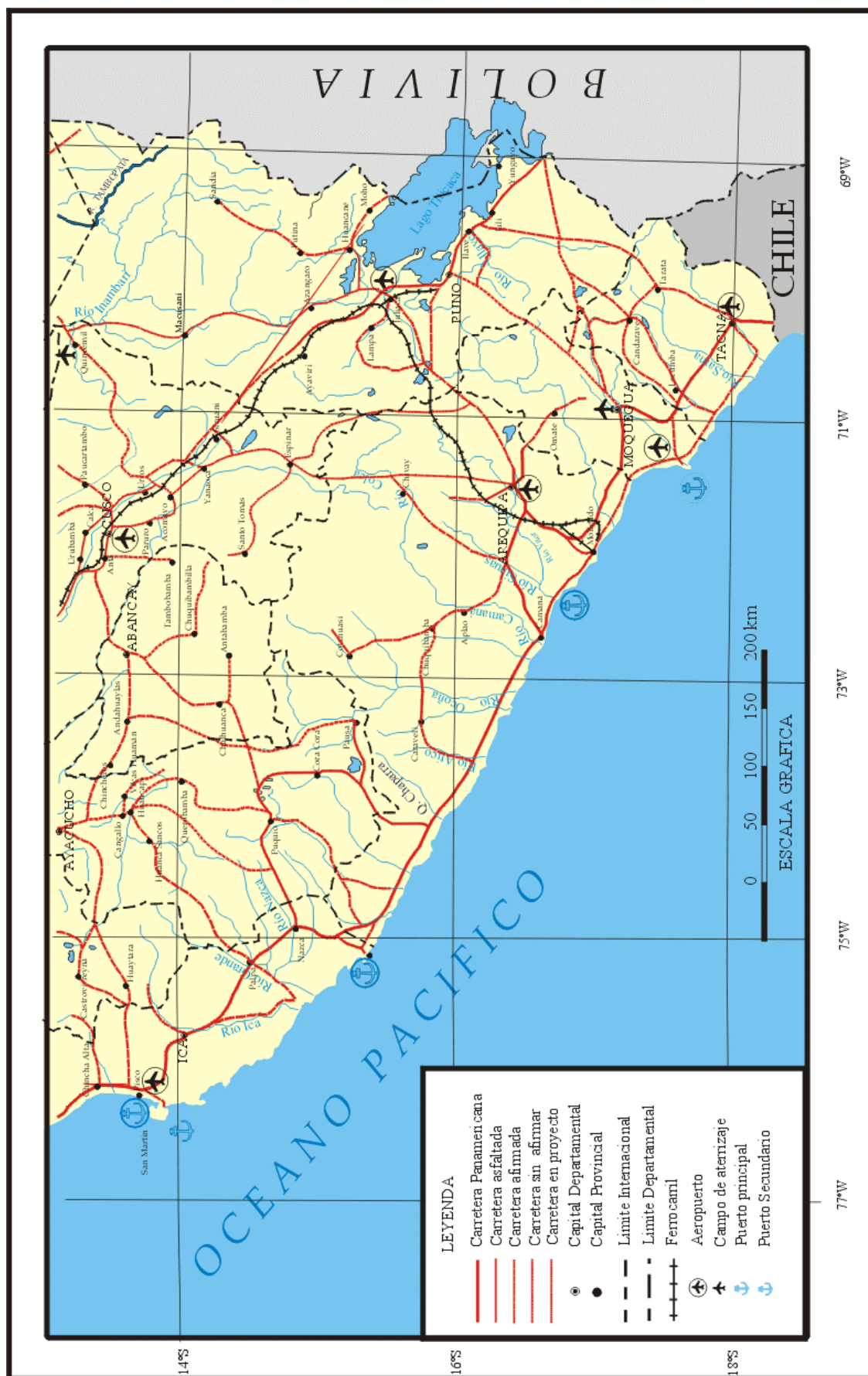


Figura 2. Mapa de vías de comunicación e hidrografía

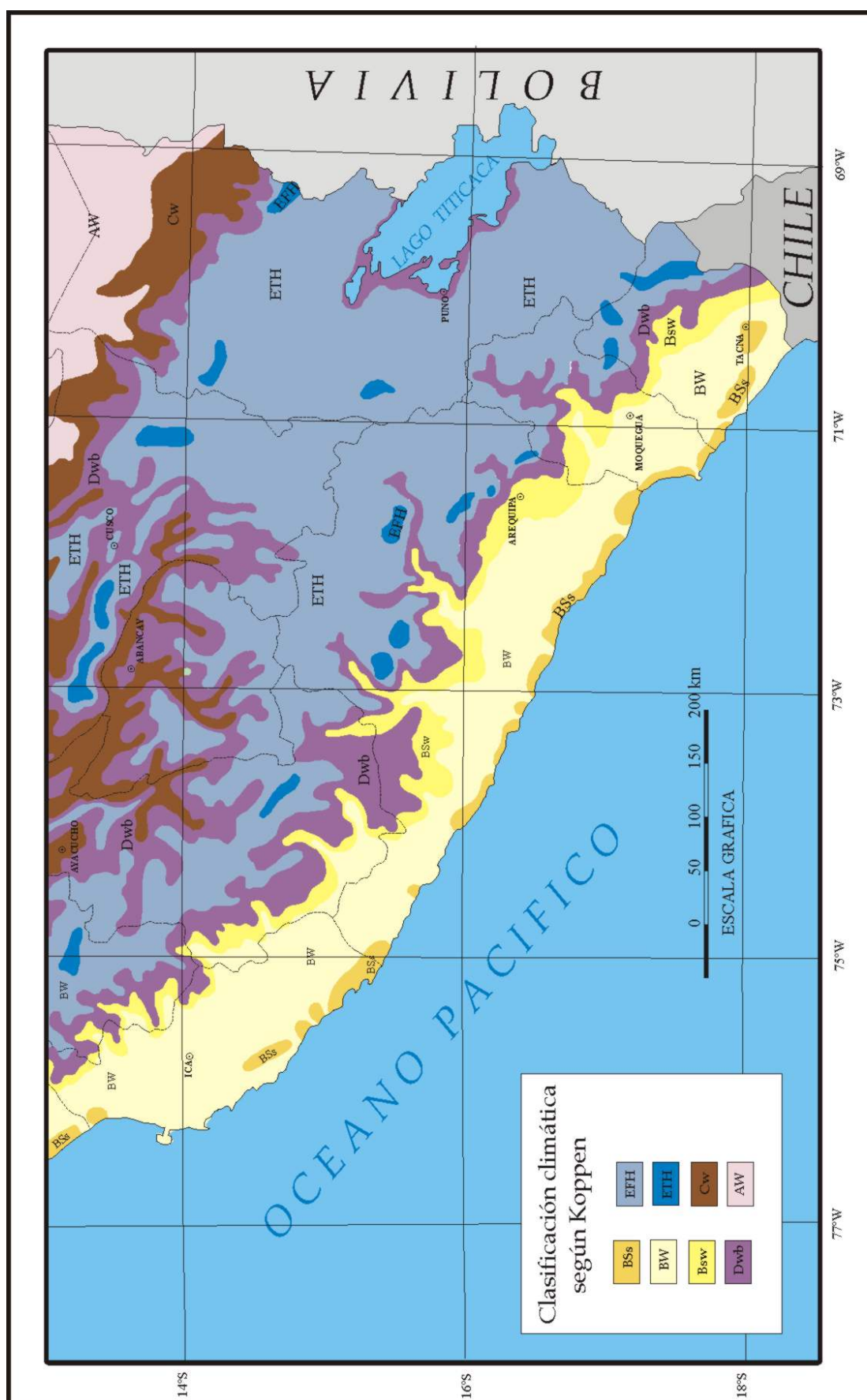


Figura 3. Mapa de clasificación climática

Capítulo 2

TECTÓNICA

A partir de la Segunda Guerra Mundial, y por razones ajenas a la ciencia, el interés por conocer la superficie de la Tierra se convierte en el foco de atención, en 1967 la geofísica fue revolucionada por el descubrimiento de la Tectónica de Placas , la teoría que explica la función de las capas más superficiales del planeta (Fowler, 1990).

Los estudios de geofísica permitieron conocer la estructura interna de la Tierra y diferenciar corteza, manto y núcleo (Fig. 4).

La corteza fue identificada por John Milne, Lord Rayleigh y Lord Rutherford, su espesor se calcula en aproximadamente 35 kilómetros bajo el continente y 7 u 8 kilómetros bajo los océanos. El manto se ubica bajo la corteza alcanzando los 2900 kilómetros de profundidad, el límite entre corteza y manto es conocido como discontinuidad de Mohorovicic.

El núcleo de la Tierra fue descubierto por Oldham en 1906 y sus límites fueron delineados por Beno Gutenberg con datos sísmicos. En 1936 se estableció que el núcleo tenía una parte interna sólida y otra parte externa líquida.

2.1 CARACTERÍSTICAS TECTÓNICAS GLOBALES

El concepto de tectónica de placas se basa en el principio que la litosfera está dividida en pequeñas placas rígidas que interactúan unas con otras, y se mueven sobre la astenósfera dando origen a siete placas principales, de las

cuales la placa Pacífica es la de mayor extensión, existiendo otras placas de menor tamaño como la placa de Nazca, Cocos y Scotia (Fig. 5).

La distribución de la actividad sísmica a nivel mundial, permitió reconocer los límites de las placas tectónicas (Fig. 6), estos cinturones sísmicos son zonas donde ocurren movimientos diferenciales entre placas (Fowler, 1990).

Los límites de placas pueden ser divididos en:

2.1.1 Límites Convergentes o destructivos

La placa oceánica al hundirse bajo la placa continental forma una cuenca larga, estrecha y profunda que se conoce como fosa oceánica. El hundimiento de la placa oceánica bajo el continente se denomina proceso de subducción.

Paralelas a las fosas oceánicas se encuentran alineamientos de volcanes activos en continente.

Si dos placas continentales colisionan dan origen a la formación de grandes sistemas montañosos como es el caso del sistema orogénico del Himalaya.

2.1.2. Límites divergentes o constructivos

En este caso las placas se separan una de otras y nuevo material derivado del manto es añadido a la litosfera. Un ejemplo de este tipo es el formado por el sistema de dorsales meso-oceánicas, a lo largo de cuyo eje se forma nuevo material, este proceso se conoce como la expansión del piso oceánico.

2.1.3 Límites conservativos o fallas transformantes

En este caso la litosfera no se crea ni se destruye. Las placas se mueven lateralmente una con otra, un ejemplo actual lo constituye la falla de San Andrés.

Existen tres tipos de fallas transformantes: dorsal-dorsal, dorsal-trinchera y trinchera-trinchera, siendo las primeras las más comunes.

2.2 MARCO TECTÓNICO EN EL PERU

El Perú, localizado en el margen occidental del continente sudamericano, está sometido a una intensa actividad de tectónica de placas donde la placa de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana

En Sudamérica el proceso tectónico ha dado origen a la cordillera de los Andes que se extiende paralela a la zona de subducción y recorre toda

América del Sur con una extensión aproximada de 8000 kilómetros; las dorsales de Nazca y Juan Fernández segmentan la fosa y diferencian dos zonas, una con ausencia de actividad volcánica actual y otra con zonas de vulcanismo activo. A partir de los 14°S donde ocurre la intersección de la dorsal de Nazca con la fosa oceánica, existen varios sistemas de fallas longitudinales del tipo inverso próximos al margen occidental, mientras al sur el sistema de fallas se encuentra en la región subandina.

Los elementos tectónicos principales presentes en el Perú son: la dorsal de Nazca, la fosa peruano-chilena y la cordillera de los Andes.

2.2.1 Dorsal de Nazca

Es una cordillera submarina asísmica que alcanza los 2000 metros de altura sobre el fondo oceánico e intercepta a la fosa peruano-chilena aproximadamente en los 14°S. La composición litológica de la dorsal de Nazca no está claramente identificada, por su forma y ubicación perpendicular a la fosa marina y al litoral, se conjetura como parte de la corteza oceánica compuesta por magmas basálticos emplazados sobre un sistema de fracturas de distensión conformadas por la subducción (Chacón, 1995).

2.2.2 Fosa peruano - chilena

La fosa Peruano-Chilena (FPC) es una fosa oceánica que se extiende desde Perú hasta Chile, marca el inicio de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana, y está considerada como una de las fosas oceánicas de mayor extensión en el mundo (5000 kilómetros) y con una profundidad máxima de 8000 metros. La FPC tiene una orientación aproximada NW-SE frente al litoral peruano.

La FPC presenta características diferentes de Norte a Sur, una zona relativamente superficial con plataforma amplia y con un flanco estratificado sedimentario a lo largo del Perú Central, hasta una parte más profunda casi sin sedimentos, con una plataforma menor o ausente a lo largo del norte de Chile (Burchfiel, 1996).

2.2.3 Cordillera de los Andes

La cordillera de los Andes se ha desarrollado como resultado de esfuerzos compresionales por la interacción de la placa de Nazca y la placa Sudamericana en los últimos 100 millones de años. Desde el Mioceno

medio los Andes centrales han experimentado intensa actividad ígnea así como orogénica (Burchfiel, 1996). Plegamientos, fallas inversas y fallas de sobre-escurrimientos han sido desarrollados a lo largo del margen oriental de los Andes, en la región sub-andina (Audebaud et al., 1973, apud Burchfiel, 1996).

La actividad sísmica superficial concentrada en ambos lados de la cordillera Andina está relacionada a la tectónica compresional, originando fallamientos inversos. La actividad sísmica relacionada a la tectónica extensional está localizada en la región de mayor altitud en los Andes (Mercier et al., 1992).

La cordillera de los Andes constituye una importante estructura que se extiende desde Venezuela hasta el Sur de Chile. La cordillera de los Andes está limitada al Oeste por la FPC y al Este por el escudo brasilero, originando importantes unidades morfoestructurales (Fig. 7).

2.3 ACTIVIDAD VOLCÁNICA

En el territorio peruano la actividad volcánica se restringe a la región sur, a partir de los 14° S, asociada al proceso geodinámico de subducción de la placa de Nazca bajo la placa sudamericana.

En el sur del Perú se han inventariado más de 400 estructuras volcánicas, dispuestas sobre una zona aproximadamente paralela a la costa. Actualmente 14 de estos edificios volcánicos son considerados activos, siendo los volcanes Sabancaya, Ubinas y Misti los volcanes potencialmente peligrosos debido a su actual estado de actividad y cercanía a ciudades, pueblos y/o a importantes obras civiles (Gonzáles, 2000).

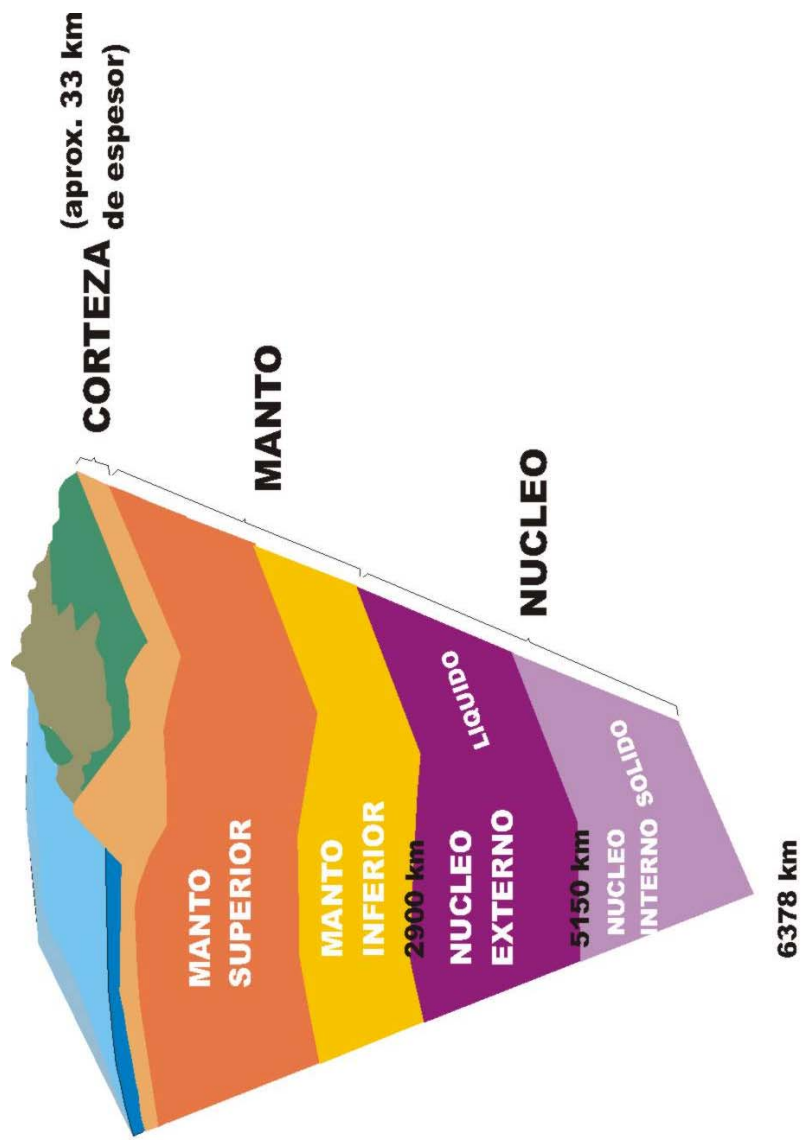


Figura 4. Estructura interna de la Tierra

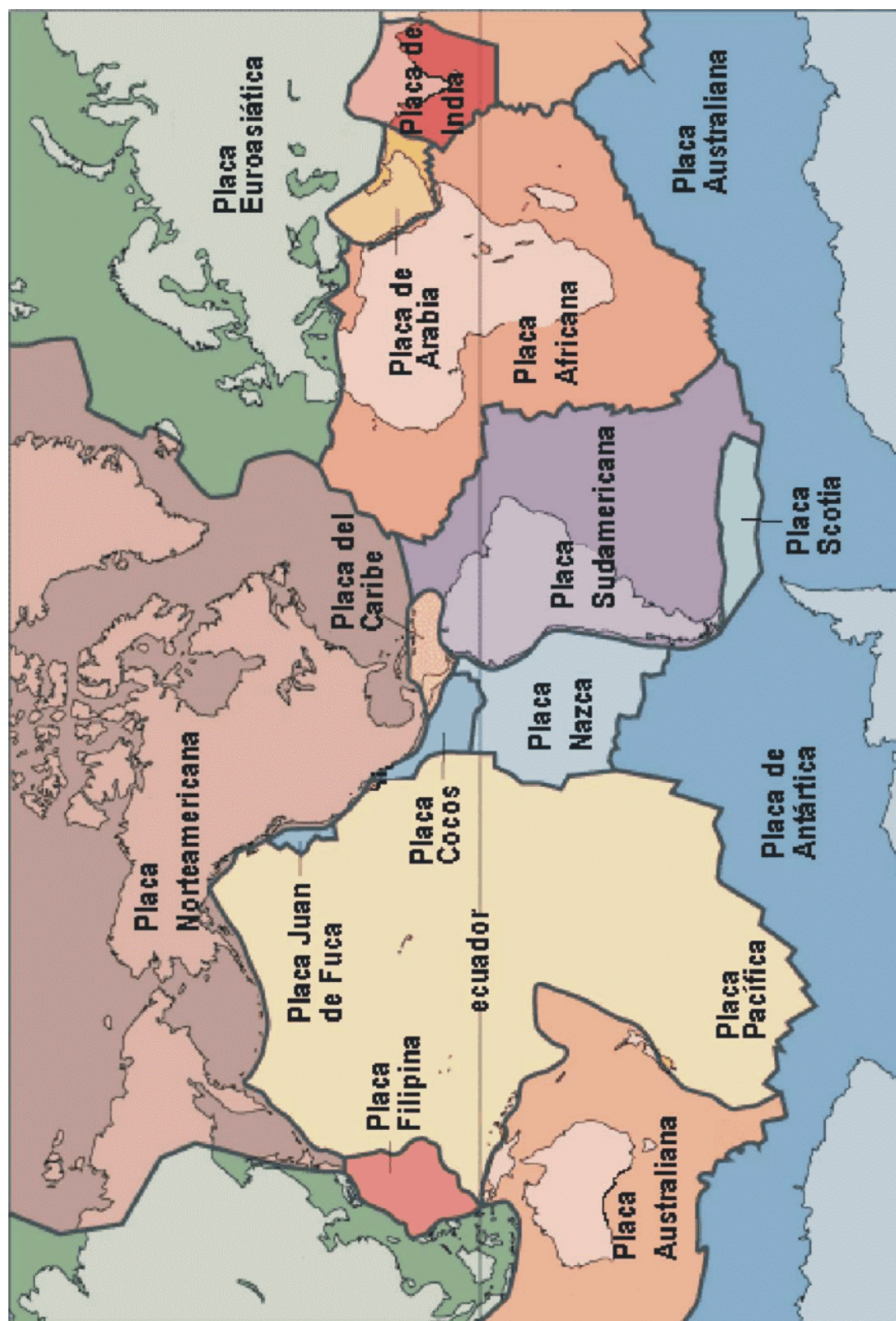


Figura 5. Las placas tectónicas a nivel mundial.

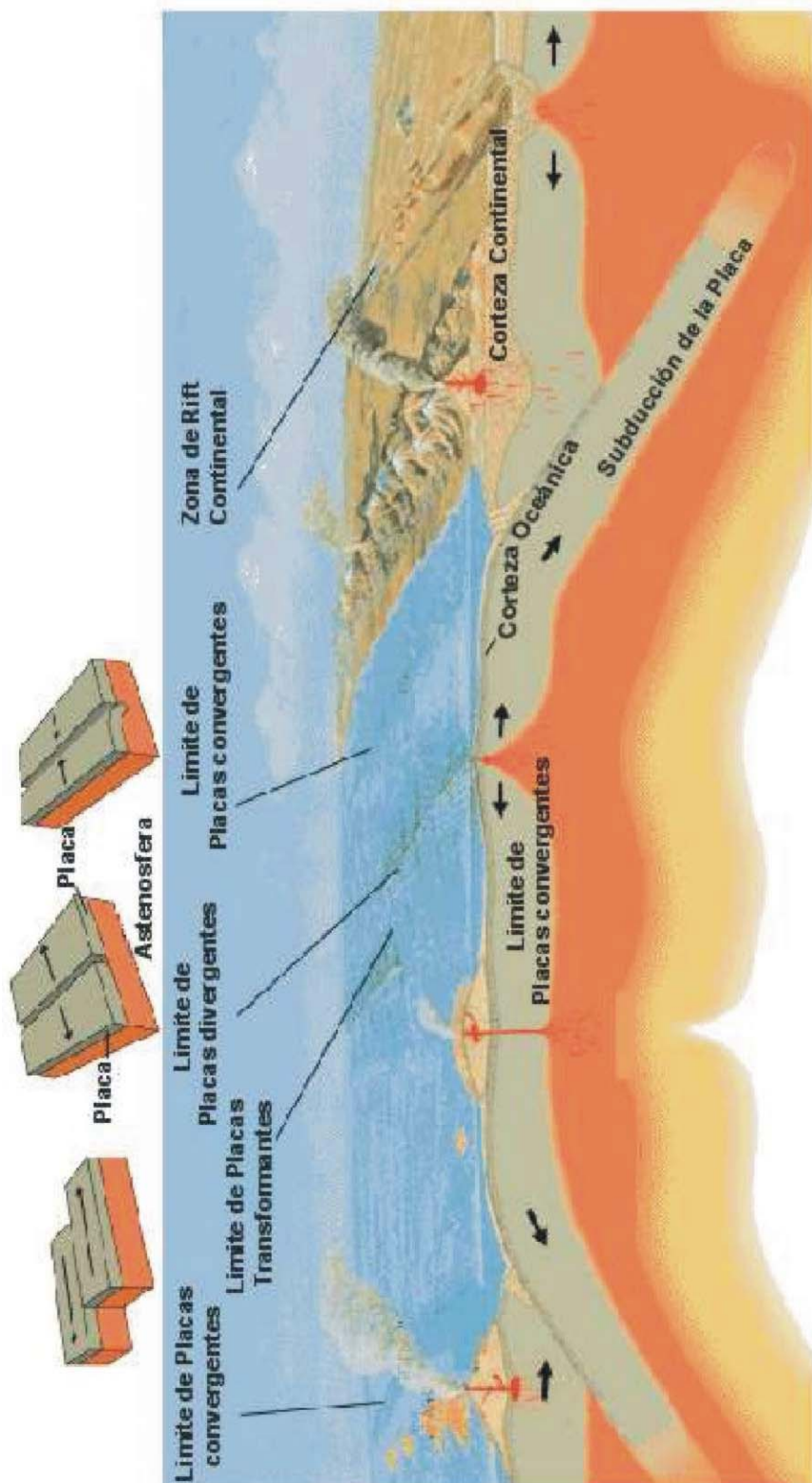


Figura 6. Procesos tectónicos y límites de placas

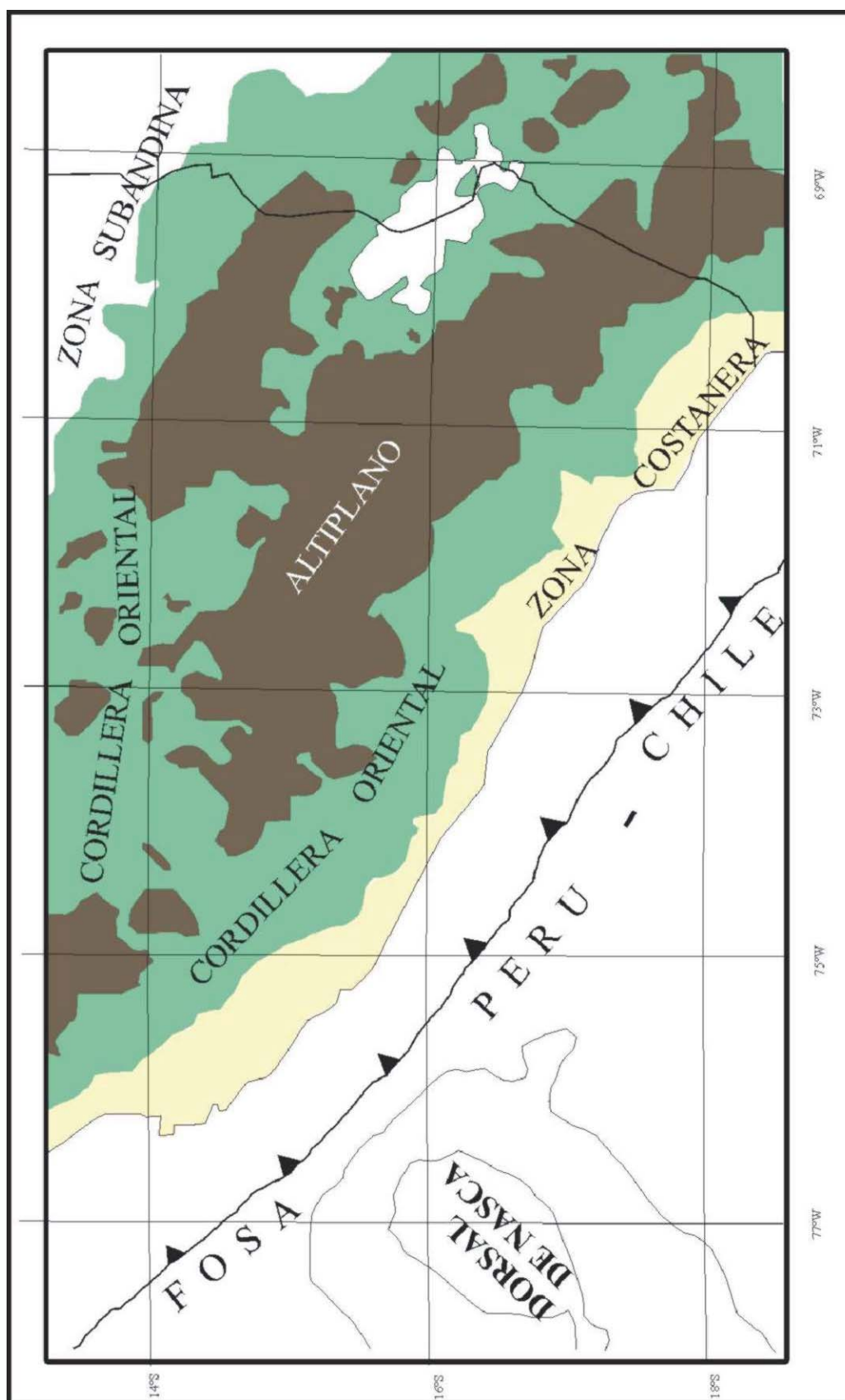


Figura 7. Unidades Morfoestructurales

Capítulo 3

FUNDAMENTO TEÓRICO

La sismología es el estudio del paso de ondas elásticas a través de la tierra, se le considera como un método poderoso y útil para conocer la estructura interna de la tierra. El estudio de los sismos ha sido importante para comprender la tectónica de placas ya que los focos sísmicos delinean con mucha precisión los bordes de las placas tectónicas, así mismo la distribución de los sismos ha permitido determinar las zonas de mayor actividad sísmica.

La propagación de las ondas sísmicas se realiza con diferentes trayectorias y características de movimiento de partículas que permiten distinguir una de otra (Figs. 8 y 9).

Con la finalidad de permitir el mejor entendimiento del tema a tratar se presentan en este capítulo algunos conceptos fundamentales de sismología que van a ser usados en el desarrollo de este trabajo.

3.1 ONDAS INTERNAS

Está constituida por dos tipos de ondas sísmicas, la onda P y la onda S que se desplazan por el interior de la Tierra, por ello la denominación de ondas internas.

3.1.1 Onda P

También conocida como onda compresional u onda longitudinal. Se desplaza por cualquier medio, sea líquido, sólido o gaseoso. Es la primera onda en registrarse en un sismograma, ya que tiene mayor velocidad.

Las ondas P, al transmitirse generan esfuerzos compresionales y dilatacionales. La fase de compresión al pasar por una estación sismográfica origina que el terreno donde se ubica la estación se comprima y registre una señal en el registro hacia arriba denominada iPc. Por el contrario si son esfuerzos dilatacionales, el terreno se dilata y registra como primer impulso de la onda P un movimiento hacia abajo denominada iPd.

3.1.2 Onda S

También llamada onda transversal o de corte, es de menor velocidad que la onda P, por lo que llega después de ella. Se propaga sólo en medios sólidos y son mejor registradas en los componentes horizontales de los sismógrafos. En un sismograma se registran como el segundo grupo conspicuo de ondas (Fig. 10).

Las ondas P y S son características de un medio elástico homogéneo e isótropo, estas ondas al propagarse por el interior de la tierra llegan a atravesar el manto y el núcleo (Fig. 11). Algunas de estas ondas sísmicas reciben los siguientes nombres:

- PKP Una onda P que desciende atravesando el manto y el núcleo externo y luego asciende atravesando el manto.
- PKIKP Una onda P que desciende atravesando el manto, el núcleo externo y el núcleo interno, para después ascender atravesando el núcleo externo y el manto.
- PKiKP Una onda P que viaja a través del manto y el núcleo externo y que fue reflejada en el límite del núcleo externo e interno. Regresa a superficie atravesando el núcleo externo y el manto
- SSP Una onda que viaja desde el foco como onda S, fue reflejada en la superficie de la Tierra cerca al foco, luego viajó como una onda S a manto como una onda S a través del manto, fue reflejada por segunda vez en la superficie de la Tierra, convertida en onda P y viajó como onda P a través del manto.

3.2 ONDAS SUPERFICIALES

Representan la mayor cantidad de energía inscrita en un sismograma. Son ondas confinadas a alguna superficie o capa durante su propagación. Se conocen dos tipos de ondas superficiales: Ondas Love y Ondas Rayleigh.

3.2.1 Onda Love

Llamada así en honor al físico que desarrolló el concepto teórico, el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación y se efectúa sólo en el plano horizontal. Estas ondas se desplazan con mayor velocidad que las Rayleigh, pero son más lentas que las ondas internas.

3.2.2 Onda Rayleigh

Las partículas siguen una órbita elíptica hacia atrás, con el plano de la elipse vertical y en la misma dirección de propagación.

3.3 PARAMETROS FOCALES DE LOS SISMOS

La determinación de los parámetros de los sismos se realiza a partir del análisis de las formas de ondas producidas por los sismos y registradas en distintas estaciones sísmicas. Los cuatro parámetros que definen la localización del foco sísmico son la hora origen (t), las coordenadas geográficas del epicentro (ϕ, λ) y la profundidad (h) (Fig. 12).

Hora Origen (t): Es la hora en la que se origina el sismo, en el cual las ondas comienzan a propagarse desde el foco sísmico.

Epicentro : Es un punto de proyección vertical del foco sísmico sobre la superficie de la Tierra. Su ubicación se hace en coordenadas geográficas, latitud (ϕ) y longitud (λ).

Foco sísmico : Es el punto en el interior de la Tierra donde comienza la ruptura y se origina el sismo, conocido también como hipocentro.

3.4 MAGNITUD

La magnitud es una medida cuantitativa de la energía liberada en el hipocentro del sismo (Silgado, 1975). El valor de la magnitud es independiente del lugar de ubicación de la estación.

Existen diferentes escalas de magnitud dependiendo de los datos que se utilizan, las principales son:

M_L , parámetro de magnitud propuesto por Richter en 1935, para aplicarla en sismos del Sur de California. La definición original está dada en función de la amplitud máxima de las ondas sísmicas, registradas en un sismógrafo Wood-Anderson ubicado a 100 km de distancia del epicentro. Esta escala comenzó a traer problemas cuando se aplicó a distintas regiones, ya que la forma de los registros depende del tipo de sismo y el tipo de estructura donde se propagan las Ondas; esto a su vez responde a características particulares del terreno. Debido a esto, surgieron otras escalas de magnitud.

m_b , utilizada para el cálculo de la magnitud de telesismos (sismos ubicados a distancias mayores a 500 km), con hipocentros (0-70 km) superficiales. Su calculo está basado en el análisis de las ondas internas.

M_S , magnitud basada en la amplitud de ondas superficiales. Se emplea para telesismos superficiales.

M_d , magnitud basada en la duración o CODA del evento sísmico. Se utiliza generalmente cuando un sismo se produce cerca a la estación sísmica y los sismogramas se saturan, en estos casos es difícil identificar la amplitud de la señal. La cuantificación de esta magnitud está en función de la duración de la señal y la distancia epicentral (Lee, 1972).

M_w , Kanamori definió la magnitud espectral, basada en el Momento Sísmico (parámetro que relaciona las dimensiones de la fuente sísmica: rigidez del medio donde se produce el movimiento (μ), el área de dislocación (S) y el desplazamiento medio de la misma (D)).

$$M_w = \frac{(\log Mo)}{1.5} - 10.7$$

3.5 INTENSIDAD SÍSMICA

La intensidad de un sismo en un punto determinado de la superficie de la tierra es la fuerza con la que se siente dicho sismo y se mide por los efectos destructivos sobre las estructuras construidas por el hombre y los efectos en la naturaleza, se constituye en una medida cualitativa bastante subjetiva.

Las escalas para medir el tamaño de un terremoto se desarrollaron de forma progresiva. Las primeras escalas propiamente dichas de la intensidad sentida en un punto se deben al trabajo de S. de Rossi y F.A. Forel, en Italia y Suiza, respectivamente quienes proponen, en 1883, la escala Rossi-Forel dividida en diez grados (I al X). Una modificación de esta escala es la propuesta por G. Mercalli (1850-1914), en 1902, primero con diez grados y, después, a propuesta de Cancani, del I al XII. Esta escala sirve de base para las usadas en la actualidad. En América se utiliza la llamada escala de Mercalli Modificada (Tabla 1), propuesta por H. Wood y F. Newmann, en 1931, y, posteriormente, por C.F. Richter, en 1956. la adoptada para Europa, en 1967, está basada en los trabajos de Medvedev en la URSS, y recibe el nombre de escala MSK (Medvedev, Sponheur y Karnik). Tiene también doce grados, siendo equivalente a la Mercalli Modificada (Udías y Mezcua, 1986).

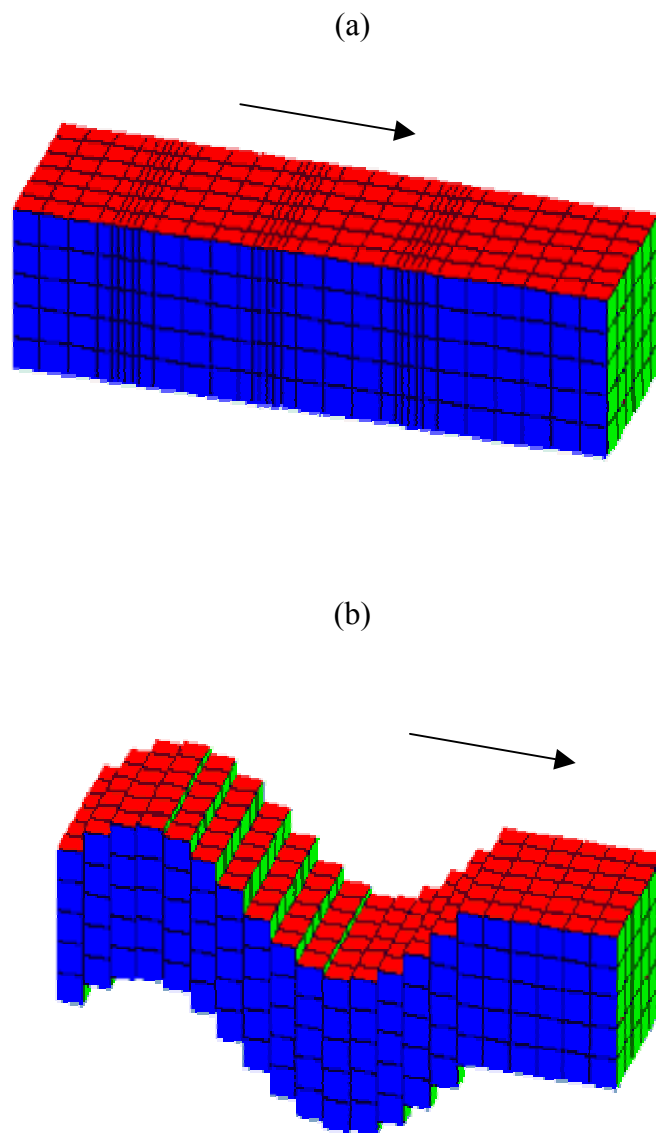


Figura 8. Movimiento de partículas para las ondas longitudinales (a) y transversales (b)

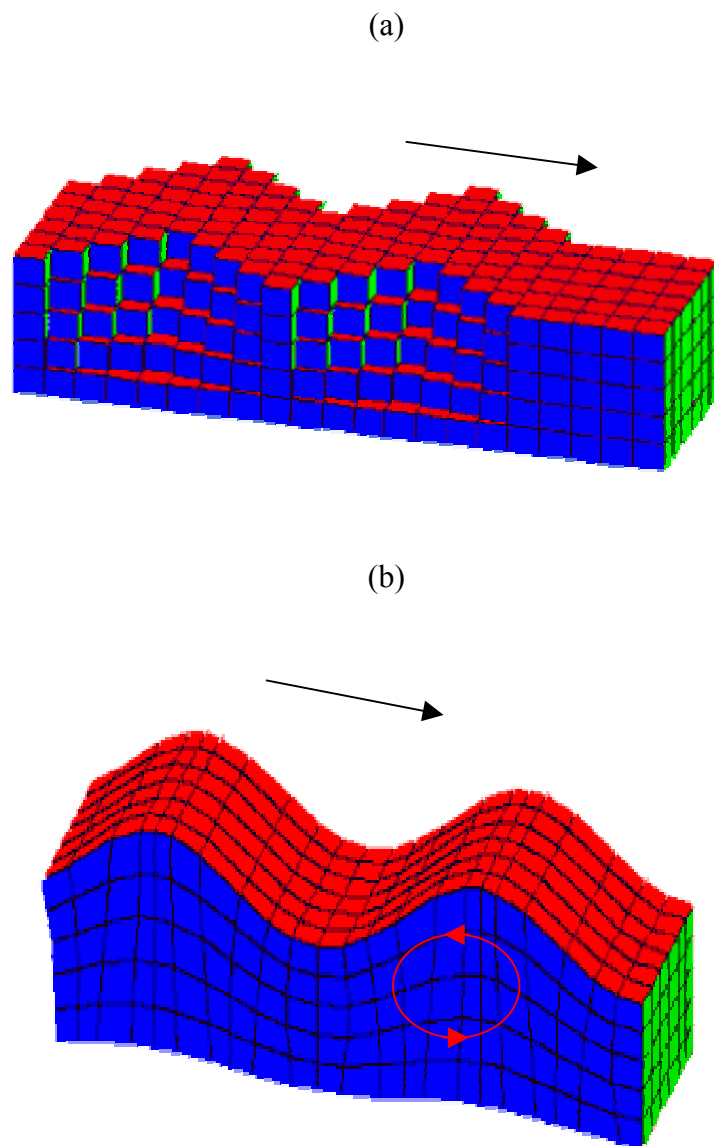


Figura 9. Movimiento de partículas para las ondas Love (a) y Rayleigh (b)

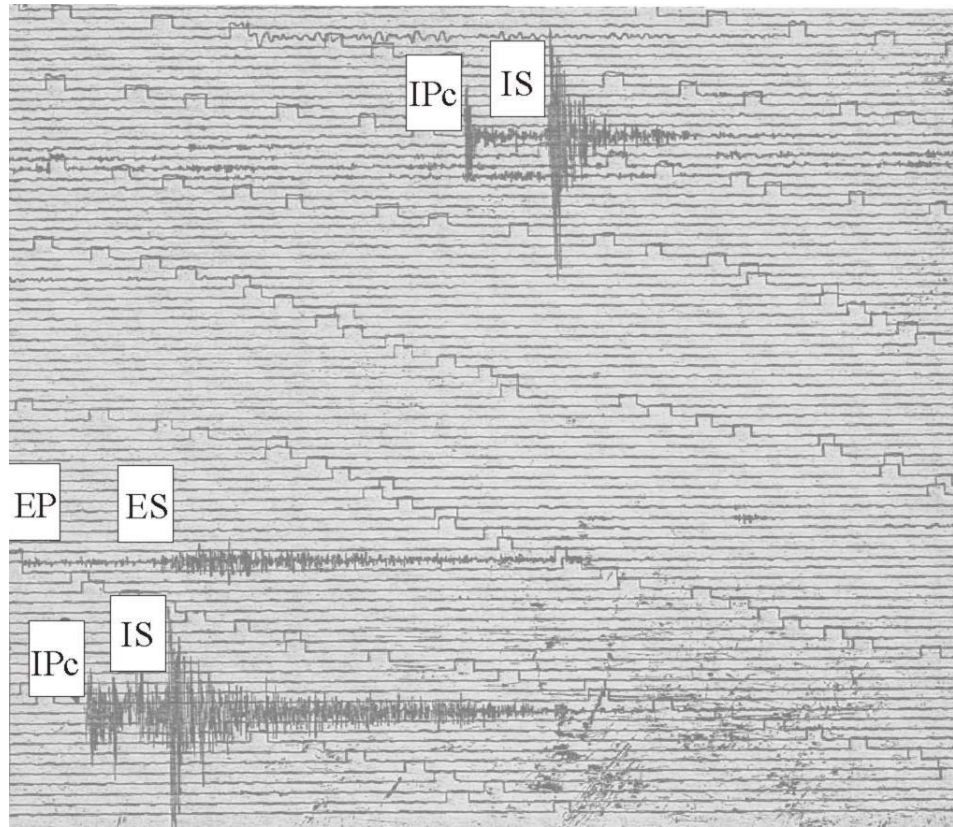


Figura 10. Ejemplo de un sismograma mostrando algunos eventos sísmicos y sus respectivas fases.

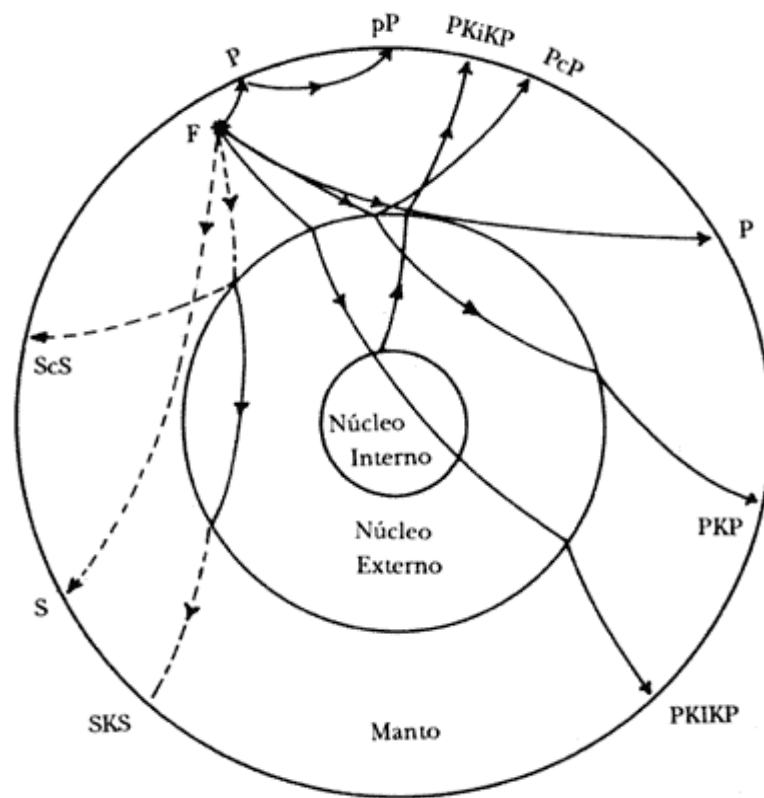


Figura 11. Propagación de ondas sísmicas en el interior de la Tierra.

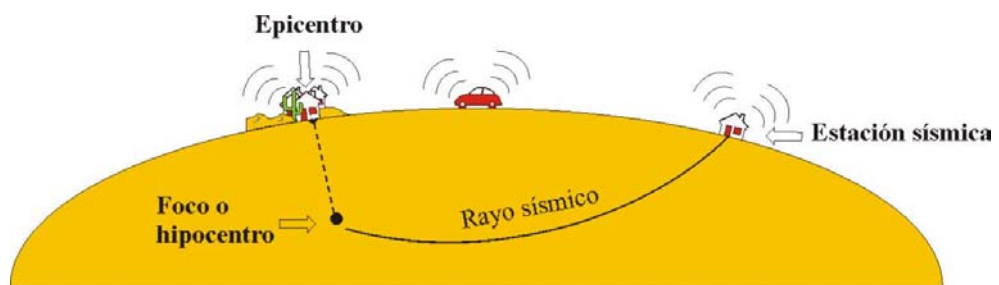


Figura 12. Se esquematizan algunos parámetros sísmicos, el hipocentro es el punto donde se inicia la ruptura y el epicentro la proyección del hipocentro en la superficie. La estación sísmica registra el arribo de las ondas sísmicas.

Tabla 1. Escala de intensidad sísmica Mercalli Modificada (1931)	
Grados	Descripción
I	No se siente, excepto por algunos en circunstancias especiales y favorables. Se observa únicamente por medio de instrumentos sísmicos.
II	Se nota únicamente por pocas personas en condiciones de quietud absoluta, especialmente en los pisos altos de edificios o en localidades muy sensibles. Objetos suspendidos oscilan ligeramente.
III	Sentido por muchas personas, principalmente en los pisos altos de los edificios, pero muchas personas no lo reconocen hasta haber encontrado que otras personas también sintieron en diferentes localidades el mismo fenómeno. Se sienten vibraciones semejantes al paso de un camión. La duración puede ser estimada.
IV	Generalmente observado por muchas personas en el interior de los edificios. Sin embargo, por algunas personas en la superficie del suelo. No causa pánico. Causa vibraciones de los muebles. Vajillas, ventanas, puertas producen sonidos, así como los muros. Oscilaciones leves en objetos suspendidos. Sensación como que un camión pesado golpeo contra el edificio. Automóviles oscilan en forma notable.
V	Observado generalmente por todas las personas. Muchas se despiertan causando pánico en algunas de ellas, pero no causa pánico en las personas al nivel del suelo. Algunas vajillas y ventanas se rompen. En algunos casos grietas en los recubrimientos. Objetos mal colocados se voltean o se desplazan. Fuerte oscilación de objetos suspendidos. Se paran los relojes de péndulo. Se notan perturbaciones en árboles, postes u otros objetos altos.
VI	Sentido por todos en edificios y con pánico de escapar al exterior. Los muebles se desplazan o se voltean. Se caen objetos en las casas, así como recubrimientos en los muros. Daños ligeros en edificios no muy sólidos. En algunos casos se dañan las chimeneas. En general los daños no son muy importantes.
VII	Observado con pánico y deseo de todos de abandonar los edificios. Difícil de mantenerse parado. Algunas chimeneas se dañan considerablemente. Daño ligero en edificios con buen diseño y construcción que contengan estructuras comunes pero bien construidas. Daños considerables en edificios mal contruidos con estructuras mal diseñadas. Notado por todas las personas que conducen vehículos. Deslizamientos pequeños. Daños en zanjas de irrigación. En general el daño en los edificios no es muy grande.
VIII	Observado con gran pánico. Ruina parcial de edificios y gran daño en otros. Generalmente sin víctimas, excepto en casos muy especiales. Daños ligeros en edificios bien diseñados con estructuras especialmente diseñadas para sismos. Daños considerables y colapso parcial o total en estructuras mal diseñadas. Tableros, muros y fachadas pueden ser expulsadas de las estructuras reticulares. Caída de chimeneas, tanques elevados, monumentos, columnas o muros solos. Muebles pueden voltearse o moverse en forma considerable. Edificios sobre pilotes defectuosos pueden fallar. Arena y limos expulsados en pequeñas cantidades. Fisuras en suelos húmedos y en las pendientes. Cambios en el nivel del agua o temperatura en los pozos. Personas manejando perturbadas.
IX	Pánico general. Daño considerable en estructuras especialmente diseñadas. Estructuras bien diseñadas se inclinan por daños en cimentación. Puede existir colapso parcial. Los edificios pueden ser desplazados de su cimentación. La tierra se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen. Deslizamientos en taludes. Desplazamiento de vías férreas y caminos. Comunicaciones suspendidas. Puentes dañados.
X	Ruina de muchos edificios y puentes con el saldo de muchas víctimas. Grandes grietas en la tierra y deslizamientos en las montañas. Edificios destruidos incluyendo sus cimentaciones. Vías de comunicación fuertemente dañadas. Suspensión de comunicaciones. Movimiento de las orillas de los ríos. Aparecen manantiales y cráteres de arena. Inundaciones, etc.
XI	Una que otra estructura de mampostería muy resistente puede quedar en pie. Los puentes destruidos. Grandes grietas en el suelo. Servicios de comunicaciones rotos y suspendidos. Movimiento de la corteza terrestre. Deslizamientos en suelos blandos.
XII	Destrucción total. Ondas sísmicas visibles. Los objetos son expulsados al aire.

Capítulo 4

EVALUACIÓN DEL PELIGRO SISMICO

El peligro sísmico es un término que ha sido confundido con el riesgo sísmico. De acuerdo a la definición de Udiaz y Mezcuca (1986) el riesgo producido por la ocurrencia de sismos puede ser estudiada bajo dos puntos de vista. El primero, la posibilidad de ocurrencia de un sismo que provoque un cierto nivel de intensidad, magnitud o vibraciones del terreno en un determinado local, conocido como peligro sísmico. El segundo, la probabilidad de que una estructura sufra algún daño por la acción del sismo, conocido como la vulnerabilidad de la estructura. El conjunto de los dos conceptos expresado en términos del costo se conoce en la actualidad como riesgo sísmico.

El estudio del peligro sísmico se puede hacer por procedimientos determinísticos y probabilísticos. El método determinístico se basa en el principio que la sismicidad de una región será idéntica a la ocurrida en el pasado y el probabilístico supone que la actividad sísmica está gobernada por leyes estadísticas, emplea funciones probabilísticas para determinar la ocurrencia de sismos.

4.1 CATÁLOGOS SÍSMICOS

Los catálogos sísmicos se clasifican en catálogos de sismos históricos y catálogo de datos instrumentales.

4.1.1 Catálogos de sismos históricos

Contienen información sobre sismos ocurridos en distintas regiones con parámetros sísmicos determinados de descripciones de los efectos causados por los sismos.

Para estudios de la sismicidad histórica de Sudamérica existe el catálogo de la Sismicidad de la Región Andina (SISRA) que compila datos de eventos sísmicos ocurridos desde 1471. La magnitud asignada a los sismos históricos ha sido calculada por diversos investigadores que utilizaron distintos métodos tales como la longitud de la zona de ruptura (Kelleher, 1972; Dorbath et al., 1990), la amplitud de los tsunamis (Abe, 1979), o a través de estimativas del momento sísmico (Pacheco y Sykes, 1992).

4.1.2 Catálogo sísmico de datos instrumentales

La información sísmica en el ámbito mundial ha aumentado a partir del año 1960, luego que se instalaron 180 estaciones sismográficas en varias regiones del mundo como parte del proyecto Vela que fue denominado “World Wide Standardized Seismograph Network o WWSSN”. En la década de los años 1970 fueron instaladas otras estaciones sísmicas de periodo largo y con registro digital para mejorar la toma de datos y precisión en localización de los epicentros.

Los catálogos del International Seismological Center (ISC) y del National Earthquake Information Center (NEIC) contienen información proveniente de datos instrumentales a partir de 1964.

El ISC es una organización no gubernamental encargada de analizar y publicar la información sísmica mundial, los datos provienen de casi 3000 estaciones sísmicas. Los catálogos del ISC están disponibles con dos años de atraso ya que los sismos son recalculados con la mayor información posible y son adicionados nuevos sismos provenientes de otras instituciones mundiales que no aportaron información al NEIC.

El NEIC es un organismo del servicio geológico de los Estados Unidos cuyo fin es determinar epicentros, en cualquier lugar del mundo, de forma preliminar.

4.2 COMPLETITUD DEL CATÁLOGO SÍSMICO

El concepto de completitud de un catálogo sísmico que en inglés se denomina “completeness”, consiste en poseer datos sísmicos dentro de un

intervalo de magnitudes y un intervalo de tiempo, para los cuales la probabilidad de detección sísmica es uniforme (Lamarre et al., 1992).

De acuerdo al procedimiento sugerido por Lamarre et al. (1992), el primer paso para determinar las incertidumbres en la evaluación del peligro sísmico es la evaluación de la completitud del catálogo sísmico, ya que de la calidad de este catálogo va a depender el resultado de las evaluaciones del peligro y riesgo sísmico.

4.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA SISMICIDAD

Los métodos probabilísticos se basan en métodos estadísticos que son utilizados para el tratamiento de la actividad sísmica tales como el método de Gutenberg y Richter, de máxima verosimilitud y de valores extremos.

4.3.1 Método de Gutenberg y Richter

Gutenberg y Richter (1956) desarrollaron relaciones empíricas para representar la frecuencia de ocurrencia de sismos de diferentes magnitudes la que es conocida como relación de recurrencia :

$$\log N = a - bM \quad (1)$$

Donde N es la frecuencia de sismos con magnitud igual o mayor a $M \pm \delta M/2$, que ocurre en un intervalo de tiempo unitario en una determinada región, a y b son constantes para ser determinada por mínimos cuadrados y δM es el incremento de la escala de magnitud que está siendo utilizada.

El parámetro a depende del intervalo de observación, de la extensión del área estudiada y del nivel de la actividad sísmica en esta área (Mogi, 1967).

El parámetro b, representa la pendiente de la recta en la relación (1), y corresponde a la proporción de sismos de determinada magnitud (Udías y Mézcua, 1986). Este parámetro puede ser utilizado en la predicción sísmica y para estudios sismotectónicos comparativos, siendo imprescindible conocer la desviación estándar para utilizarlo en las pruebas estadísticas de comparación (Bullen y Bolt, 1987).

4.3.2 Método de máxima verosimilitud

Según la fórmula de Utsu (1966) el parámetro b puede ser obtenido de:

$$b = \frac{\log e}{M' - M_1} \quad (2)$$

Donde M' es la magnitud media de las magnitudes mayores que el umbral

M_1 determinado para el cálculo de (2) correspondiente a:

$$M' = \frac{\sum (NM)i}{\sum Ni} \quad (3)$$

Los valores de i varían desde 1 hasta n , siendo 1 el primer valor mayor que el umbral M_1 . La desviación típica de b en este caso es dado por $\sigma = b/\sqrt{n}$, donde n es el número de observaciones con $M' > M_1$.

4.3.3 Método de valores extremos

El método de valores extremos es utilizado para calcular la probabilidad de la ocurrencia de sismos de determinada magnitud en un intervalo de tiempo (Lomnitz, 1974).

La distribución matemática de Gumbel conocida como del Tipo 1 fue aplicada por Lomnitz (1974) en los estudios de sismicidad.

La ecuación usada tiene la forma:

$$G(m) = \exp(-\alpha e^{-\beta m}) \quad (4)$$

Donde, $G(m)$ representa la probabilidad de la “no ocurrencia” de un sismo de magnitud m ; $m \geq 0$ es la máxima magnitud de los sismos ocurridos en cada año (valor extremo); α y β son constantes que se deben determinar por el método de los mínimos cuadrados de la forma:

$$\ln[-\ln G(m)] = \ln \alpha - \beta m \quad (5)$$

Para la determinación de las constantes α y β es necesario tener los valores máximos de magnitud anual en un número consecutivo de años y organizados en orden decreciente de magnitud. Los valores de $G(m)$ son estimados a través de la siguiente relación:

$$G(m_j) = \frac{j}{(n+1)} \quad (6)$$

Donde, $j = 1, 2, \dots, n$; y n es el número consecutivo de años.

El valor de α es el promedio anual de sismos, de magnitud mayor que cero.

4.3.4 Probabilidad de ocurrencia

Lomnitz (1974) ha definido la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud m o mayor en un periodo D de años y puede ser determinado con la siguiente ecuación:

$$R_D(m) = 1 - \exp(-\alpha D e^{-\beta m}) \quad (7)$$

Donde α y β han sido calculados de la ecuación (5).

Capítulo 5

SISMICIDAD EN EL SUR DEL PERU

El Perú está localizado dentro del cinturón de fuego del Pacífico, con un alto potencial sísmico debido al proceso de tectónica de placas.

En el sur del Perú han ocurrido sismos de elevada magnitud, los sismos más destructivos archivados en relatos históricos son los de 1604 y 1868 con magnitudes de 8,6 y 8,8 en la escala M_w , causando intensidades en la escala Mercalli-Modificada de IX y X respectivamente.

El estudio de la sismicidad permitirá conocer y encontrar una relación entre las características tectónicas y las fuentes generadoras de estos sismos.

La profundidad máxima considerada para este estudio es de 300 kilómetros, sismos de mayor profundidad no producen daños en superficie.

5.1 ELECCIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO PARA EL SUR DEL PERÚ

La base para un buen estudio de la sismicidad es un catálogo sísmico que debe contener la mayor información posible para efectuar el análisis y tratamiento estadístico de los datos.

El catálogo sísmico (CS) para fines de este estudio fue elaborado con los datos del catálogo de Engdahl et al. (1998) que utiliza los mismos datos de las estaciones usadas por el ISC y el NEIC, sin embargo los sismos fueron relocalizados usando, además de las lecturas de las fases P y S, los tiempos de arribo de las fases PKiKP y PKPdf así como de las fases telesísmicas de profundidad pP, pwP, sP. Las diferencias entre las determinaciones

epicentrales del ISC y el CS son debidas principalmente a los distintos modelos de velocidad y a las fases adicionales utilizadas por estos últimos.

5.2 EVALUACIÓN DE LA COMPLETITUD DEL CATALOGO SÍSMICO

El CS debe pasar una previa evaluación para ser considerado idóneo en la evaluación del peligro sísmico, es necesario comparar los datos sísmicos del catálogo utilizado con la finalidad de eliminar duplicados, réplicas y premonitores.

El primer paso es identificar el sismo principal, aquel de mayor magnitud, y discriminar las réplicas y premonitores considerando una ventana espacio - temporal. La ventana espacial consideró un área con un radio de 111 kilómetros alrededor del sismo principal, como ventana temporal se utilizó un periodo de análisis de 6 meses antes y después del sismo principal.

A fin de homogeneizar el catálogo sísmico, el parámetro más importante es la magnitud por lo que se han expresado todos los sismos en una misma escala de magnitudes.

Lo ideal sería tener magnitudes expresadas en la escala M_W , ya que representa mejor el tamaño del sismo y no se satura para valores altos, pero en la realidad aún no se tiene este dato disponible.

La mayor cantidad de sismos tienen sus valores de magnitud expresados con magnitudes en la escala m_b , y un reducido número en la escala M_S y M_W . Debido a este inconveniente se decidió expresar todos los eventos sísmicos en la escala m_b para lo que se hizo una relación lineal entre magnitudes $M_S - m_b$ y $M_S - M_W$.

5.3 ANÁLISIS ESPACIAL DE LA SISMICIDAD

Para la determinación de las fuentes sismogénicas se ha hecho un análisis de la distribución epicentral y de secciones sísmicas, en el primer caso se distinguieron agrupamientos de sismos relacionados a las características tectónicas de la región estudiada y en el segundo caso el análisis de secciones sísmicas transversales permitió visualizar la geometría de la ZWB.

5.3.1 Distribución epicentral

La distribución epicentral de los sismos ocurridos en la región de estudio y asociados al proceso de subducción son mostrados en la Fig. 13. Se observa que los sismos superficiales se distribuyen en el margen occidental

marcando el inicio de la zona de subducción; los sismos de profundidad intermedia se distribuyen a partir del margen continental hacia el Este.

5.3.2 Secciones sísmicas

Fueron elaboradas cinco secciones transversales a la fosa oceánica (Fig. 14), esto se hizo con la finalidad de determinar la geometría de la ZWB y para identificar las posibles fuentes sismogénicas.

La actividad sísmica que ocurre frente a la intersección de la dorsal de Nazca entre 13° y 17° S, está representada en las secciones A-A', B-B', C-C'. Se distinguen dos agrupamientos de sismicidad, una que está entre los 0 y 100 kilómetros, otra donde los hipocentros determinan una ZWB con bajo ángulo de buzamiento, hasta una profundidad de 150 kilómetros.

El extremo sur del Perú, a partir de 17° S, está representado en las secciones D-D' y E-E', los sismos se distribuyen con un ángulo de buzamiento de aproximadamente 30°. Los hipocentros se distribuyen en forma continua hasta 250 kilómetros de profundidad.

5.4 FUENTES SISMOGÉNICAS

Fueron seleccionados en el CS un total de 490 eventos con $m_b \geq 4,0$, ocurridos dentro de la región de estudio en el intervalo 1964-1995.

5.4.1 Delimitación de fuentes sismogénicas

Del análisis del mapa de distribución epicentral y las secciones transversales se han delimitado dos fuentes sismogénicas (Fig.15).

La fuente sismogénica 1 (FS1), con actividad sísmica hasta los 100 kilómetros, representa la actividad sísmica relacionada con el inicio de la zona de subducción que se distribuye en el margen litoral, entre la fosa oceánica y el continente.

La fuente sismogénica 2 (FS2), presenta sismos con profundidad intermedia entre 90 y 250 kilómetros al este de FS1, la actividad sísmica se distribuye en el continente y representa la prolongación en profundidad de la ZWB.

5.4.2 Características de las fuentes sismogénicas

Para cada fuente sismogénica se ha efectuado el análisis estadístico utilizando los métodos descritos en el capítulo anterior. Los resultados de los métodos frecuencia – magnitud y valores extremos, así como la

magnitud umbral (M_l) determinada para cada fuente, son mostrados en la Tabla 2.

Fuente sismogénica 1 : Fueron seleccionados 260 sismos con profundidades máximas de 100 kilómetros. La distribución temporal (Fig. 16a) permite observar a lo largo de los 32 años una actividad sísmica uniforme; el número de sismos con $m_b \geq 4,0$ aumenta a partir de 1965, la máxima magnitud alcanzada en esta fuente fue de 6,2 m_b . La distribución frecuencia-magnitud y valores extremos, son presentados en la Fig. 17a.

Fuente sismogénica 2: Un total de 230 sismos fueron seleccionados en esta fuente sismogénica, las profundidades varían entre 90 y 250 kilómetros. La distribución temporal de la sismicidad (Fig. 16b) muestra una concentración de sismos entre 4,4 m_b y 5,2 m_b , la magnitud máxima en esta fuente fue de 6,3 m_b . Del mismo modo se hicieron las curvas frecuencia - magnitud y valores extremos como se puede ver en la Fig. 17b.

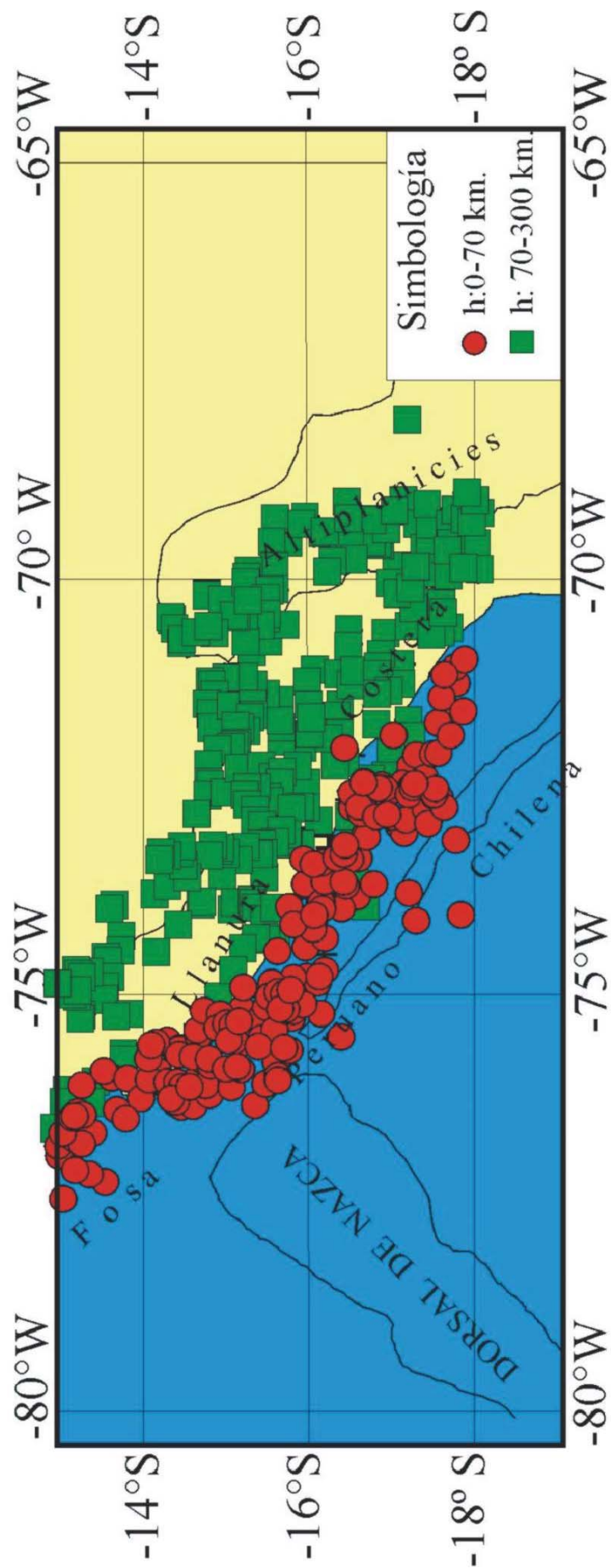


Figura 13. Distribución epicentral de los sismos ocurridos en el área de estudio entre los años 1964 y 1995

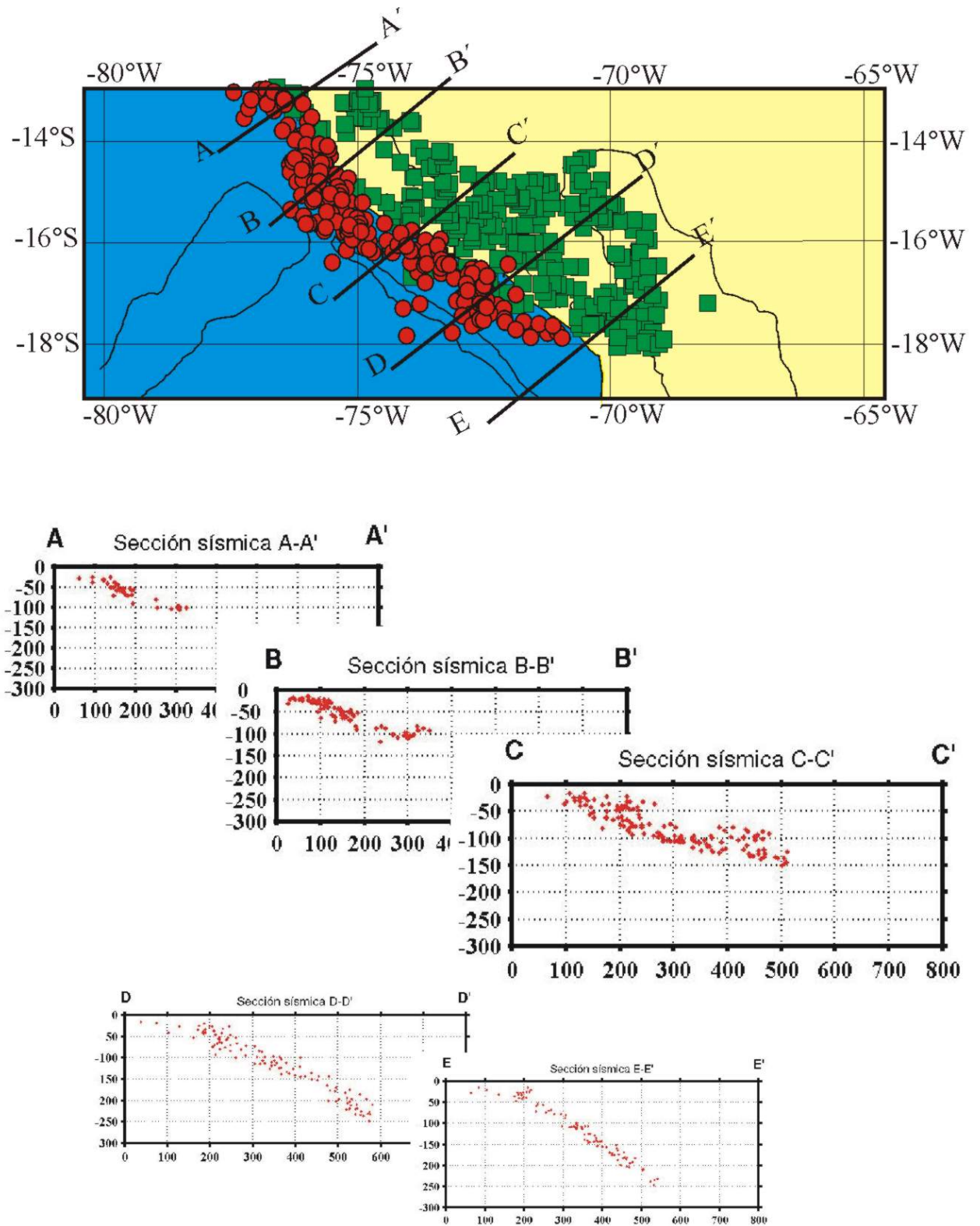


Figura 14. Secciones sísmicas donde se puede observar la geometría de la ZWB

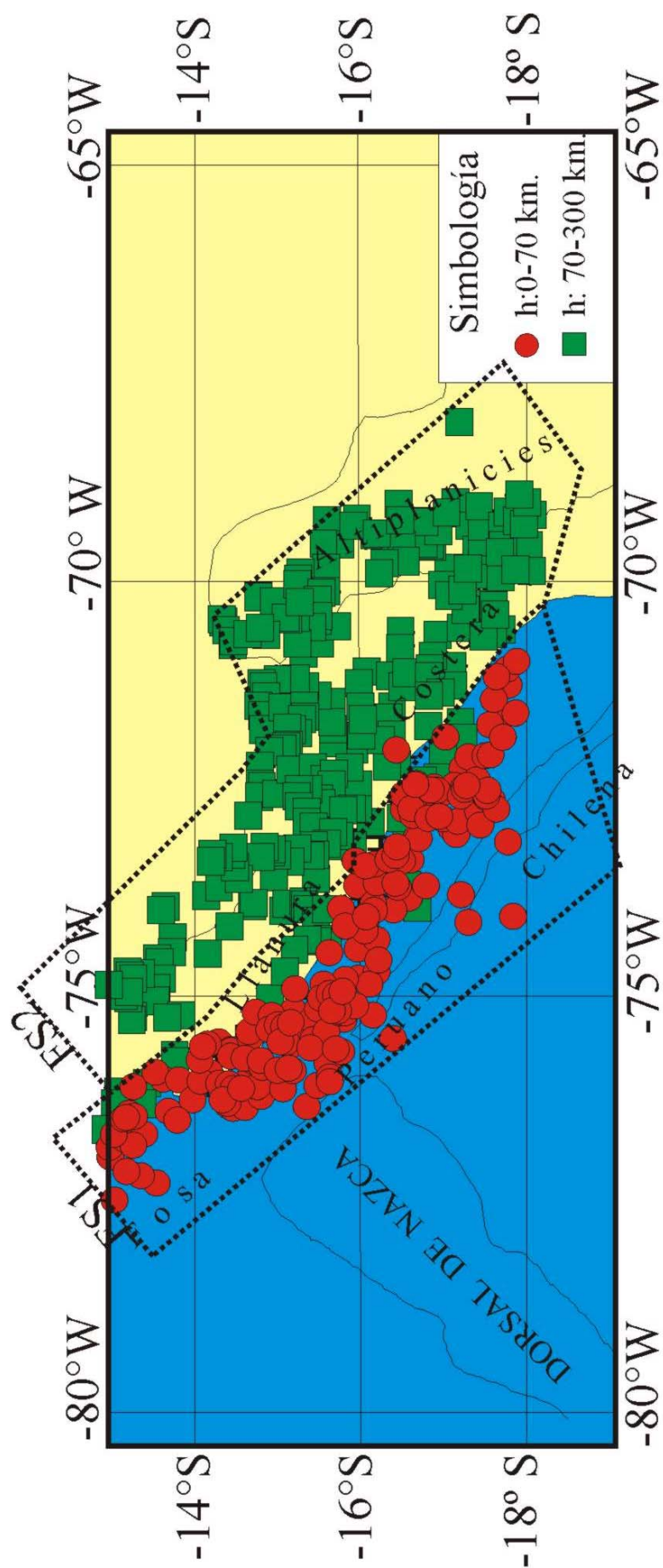


Figura 15. Fuentes sísmicas delimitadas para el área de estudio.

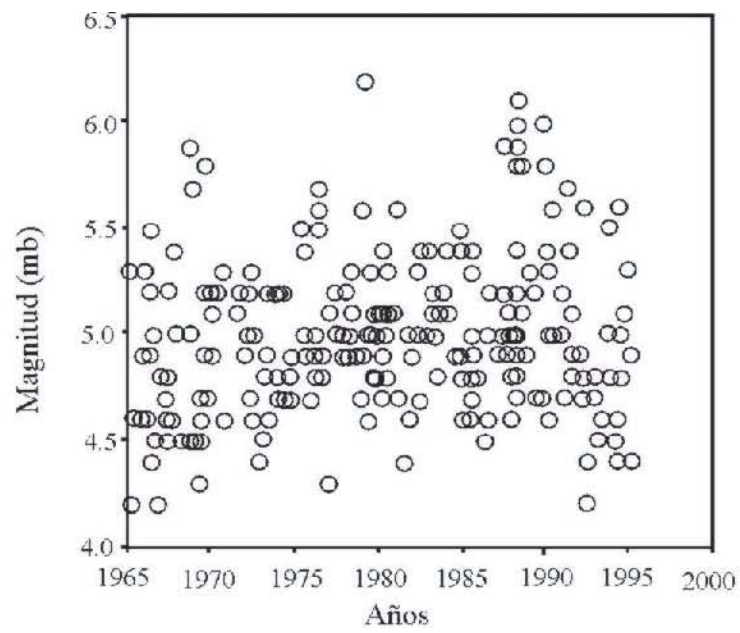


Figura 16a. Distribución temporal en la Fuente Sismogénica 1

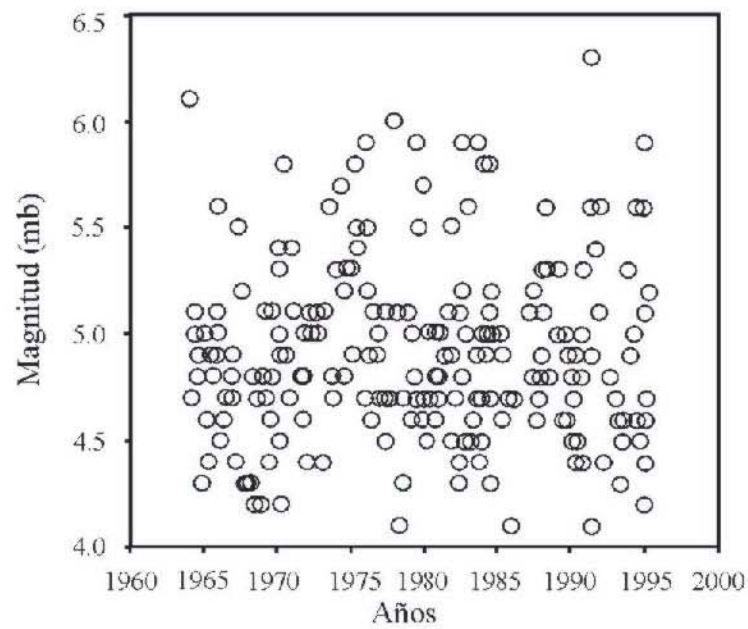


Figura 16b. Distribución temporal en la Fuente Sismogénica 2

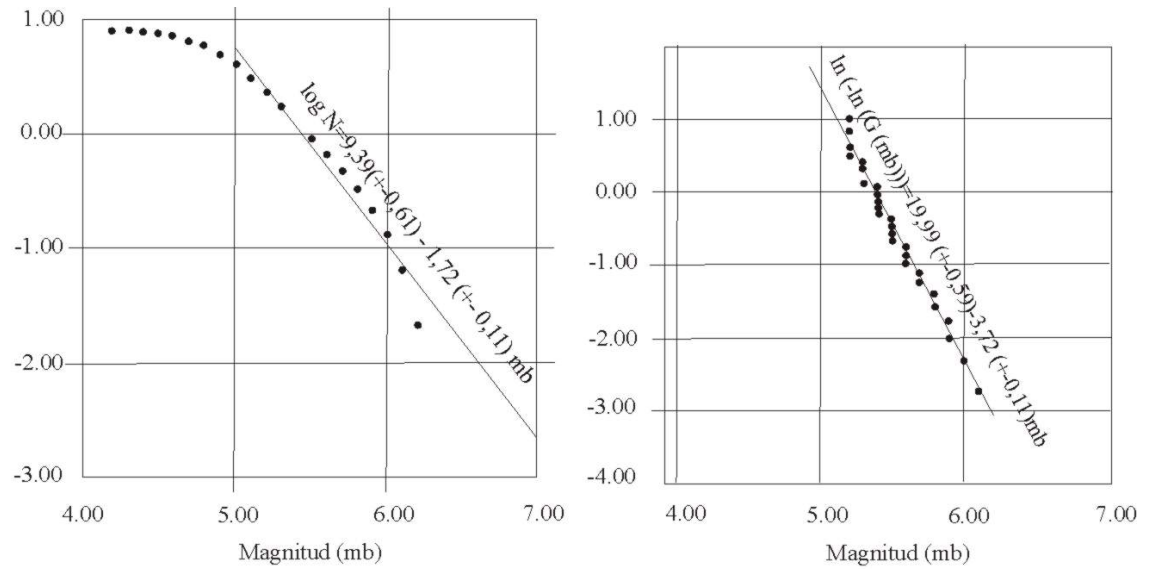


Figura 17a. Relación frecuencia-magnitud (izquierda) y de valores extremos (derecha) para la fuente sismogénica 1.

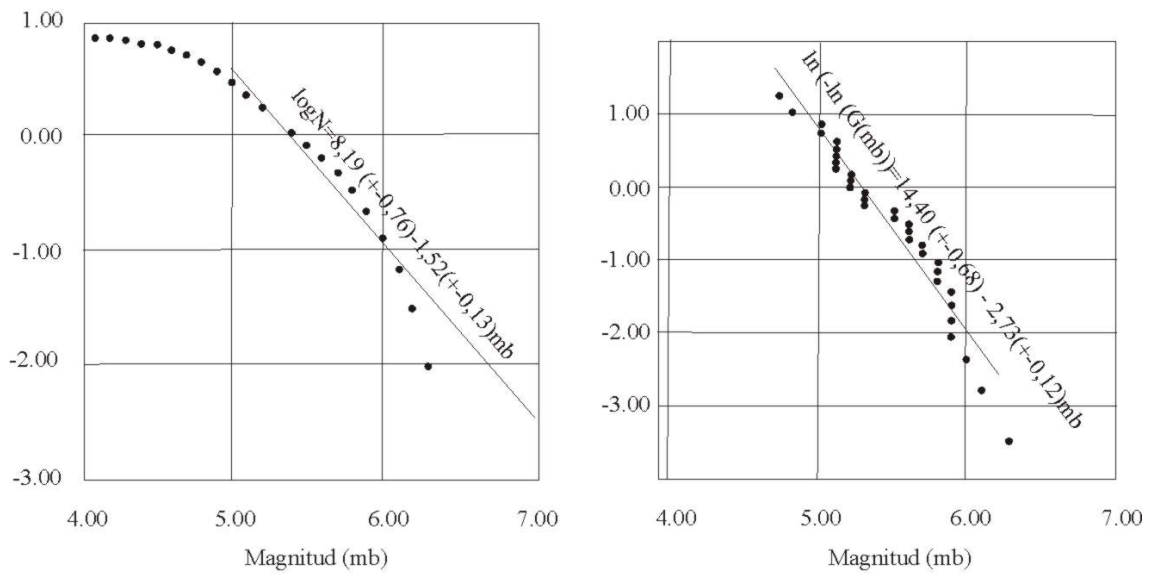


Figura 17b. Relación frecuencia-magnitud (izquierda) y de valores extremos (derecha) para la fuente sismogénica 2.

Tabla 2. Ecuaciones determinadas utilizando los métodos estadísticos respectivos para cada fuente sísmogénica

FS	M _l	Frecuencia-magnitud (FM)	Valores extremos (VE)
1	5,0	LogN=9,39-1,72m _b	$\ln(-\ln G(m_b)) = 19,99-3,72m_b$
2	5,0	LogN=8,19-1,52m _b	$\ln(-\ln G(m_b)) = 14,40-2,73m_b$

Capítulo 6

RESULTADOS

6.1 EVALUACIÓN DEL CATÁLOGO SÍSMICO

El catálogo sísmico para la región de estudio contiene un total de 490 sismos seleccionados del catálogo de Engdahl para el periodo de 1964 a 1995. Los eventos seleccionados tienen magnitudes superiores a 4,0 m_b y profundidades entre 0 y 250 kilómetros.

6.1.1 Análisis temporal

De la figura 16a y 16b se distingue una actividad sísmica uniforme desde el año 1964 hasta 1995 para sismos con magnitudes superiores a 4,0 m_b . Hay predominancia de sismos entre las magnitudes 4,6 y 5,4 m_b en ambas fuentes sismogénicas, entre los años 1970 y 1985 se observa una disminución de sismos con magnitudes $m_b < 4,5$.

6.1.2 Análisis espacial

Los sismos superficiales están localizados principalmente entre el litoral y la FPC, formando la parte más superficial de la zona de subducción.

En el mapa de epicentros de la Fig.13, se observa que la actividad sísmica de profundidad intermedia está distribuida en mayor cantidad hacia el continente, definiendo la geometría de la zona W-B en esta región.

En la figura 14 se presentan las secciones sísmicas perpendiculares a la orientación de la zona de subducción. Estas secciones permiten observar que la ZWB, no tiene una geometría uniforme desde norte a sur, este

cambio en el buzamiento de la ZWB estaría indicando que existe una contorsión de la placa que subduce bajo la placa sudamericana.

6.2 FUENTES SISMOGENICAS

Se definieron dos agrupamientos de sismicidad principales:

Fuente sismogénica 1 localizada en el margen occidental , está constituido por 260 sismos con profundidades variando entre 0 y 100 kilómetros, magnitudes entre 4,0 y 6,2 m_b .

Fuente sismogénica 2 está localizada en el continente, donde ocurrieron 230 sismos con profundidades variando entre 90 y 250 kilómteros, magnitudes entre 4,0 y 6,3 m_b .

El análisis estadístico para cada fuente sismogénica se ha realizado utilizando los métodos de Gutenberg-Richter (FM), el método de máxima verosimilitud (MV) y valores extremos (VE).

6.3 PARÁMETRO b

Los valores del parámetro b calculados utilizando cada método estadístico.

FS	b (FM)	b (MV)
1	1,72	1,20
2	1,70	1,08

Para ambas fuentes sismogénicas el valor de b resultado del método de FM, tiene un valor muy alto comparado al valor hallado con el método de MV. El valor de b calculado con el método de MV es el utilizado por la mayoría de investigadores ya que en su cálculo no influye la existencia de algunos sismos de magnitudes altas lo que sí ocurre con el otro método.

El mayor valor de b en la fuente FS1 con respecto a FS2, nos indica que en FS1 predominan sismos con baja magnitud caracterizándose por su baja resistencia a los esfuerzos. Un bajo valor en FS2 indicaría que el medio ofrece mayor resistencia a los esfuerzos , por lo que ocurren sismos de grandes magnitudes.

6.4 PERIODOS DE RETORNO

Graficando el periodo de retorno de cada fuente sismogénica se obtiene como resultado, para distintas magnitudes, las curvas presentadas en la figura 18.

De acuerdo a esta relación se determina en la fuente sismogénica 1 que el periodo de retorno para sismos con magnitud de 6,9 m_b es de 300 años y para una magnitud de 7,0 m_b es de 300 años.

La historia sísmica ha registrado dos sismos que por su localización epicentral habrían ocurrido en la fuente sismogénica 1, estos son:

Fecha	Latitud (S)	Longitud (W)	M_W	m_b
24-11-1604	-17.88	-70.94	8,7	6,9
13-08-1868	-18.00	-71.00	8,8	7,0

Si consideramos que ambos sismos tienen similares características, ya que el cálculo de la magnitud no ha sido hecho con datos instrumentales, el periodo de retorno estaría en el orden de 264 años.

6.5 PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Utilizando la ecuación (7) para un sismo con $m_b > 6,5$ y para periodos de retorno de 50, 100, 150, 200 y 300 años se obtienen las siguientes probabilidades de ocurrencia :

Fuente Sismogénica	50 años	100 años	150 años	200 años	300 años
1	0.5311	0,7801	0.8969	0.9516	0.9894
2	0.8285	0,9706	0.9949	0.9991	0.9999

Como se observa en la fuente sismogénica 1, a partir de 200 años de periodo de retorno hay una alta probabilidad de ocurrencia de sismos de magnitud superior a 6,5 m_b . La fuente sismogénica 2 tiene una alta probabilidad de ocurrencia de sismos con magnitudes similares al anterior pero a partir de periodos de retorno de 100 años.

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- La mayoría de sismos superficiales, asociados al proceso de subducción, se ubican en el margen occidental del continente entre la línea de costa y la FPC. Esta actividad superficial delimita el inicio de la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.
- 2.- Los sismos de foco superficial ocurren con mayor frecuencia que sismos de profundidad intermedia.
- 3.- La buena calidad de los parámetros hipocentrales utilizados en este trabajo, provenientes de las relocalizaciones efectuadas por Engdahl et al. (1998), permitieron definir muy bien la geometría ZWB e identificar 2 fuentes sismogénicas distintas.
- 4.- Las secciones sísmicas muestran cambios en el buzamiento de la ZWB a lo largo de la región de estudio. Esto confirmaría la contorsión de la placa de Nazca conforme descrito por distintos autores como Hasegawa y Sacks (1981), Grange y otros (1984), Boyd y otros (1984), Schneider y Sacks (1987).
- 5.- Utilizando los resultados del método de valores extremos se determina que la probabilidad de ocurrencia de un sismo de magnitud mayor a $6,5 m_b$ es muy alta para un periodo de 200 años en FS1. En FS2 la probabilidad de ocurrencia de un sismo, con magnitud mayor a $6,5 m_b$, es muy alta en 100 años.

6.- De acuerdo a la curva del periodo de retorno un sismo de magnitud 6,9 m_b debe ocurrir cada 300 años en la fuente sismogénica 1, y cada 200 años en la fuente sismogénica 2.

7.- Los sismos que ocurrieron en 24-11-1604 y 13-08-1868 alcanzaron magnitudes de 6,9 m_b (8,7 M_w) y 7,0 m_b (8,8 M_w) respectivamente, las intensidades alcanzaron IX y X grados en la escala de Mercalli Modificada. De acuerdo a la probabilidad de ocurrencia y al periodo de retorno se debe esperar que un sismo con características similares se presente cada 200 años.

El Perú es un país de gran actividad sísmica, por lo que estamos expuestos a la ocurrencia de sismos de gran magnitud. La ubicación de muchas ciudades densamente pobladas cerca de la zona de subducción, las expone a ser víctimas de los efectos destructivos de los sismos, por esta razón se recomienda.

1.- Para reducir el potencial de daño en las edificaciones es necesario exigir el cumplimiento de las normas de diseño sismorresistente, y orientar a la población para la correcta ubicación y diseño de sus viviendas.

2.- Es necesario una política educativa a todo nivel con la finalidad de educar y concienciar a los ciudadanos sobre el comportamiento individual y grupal en caso de la ocurrencia de sismos.

3.- Se deben hacer estudios detallados para conocer la profundidad, composición, propiedades dinámicas y mecánicas de los suelos sobre los que se asientan las ciudades más importantes, para evaluar las amplificaciones que se presentarían al ocurrir un sismo.

4.- Se debe evaluar el potencial de efectos geológicos ante la ocurrencia de un sismo, deslizamientos de terreno son frecuentes dadas las características morfológicas de nuestro territorio. El fenómeno de licuefacción que se puede presentar en zonas de saturación de agua.

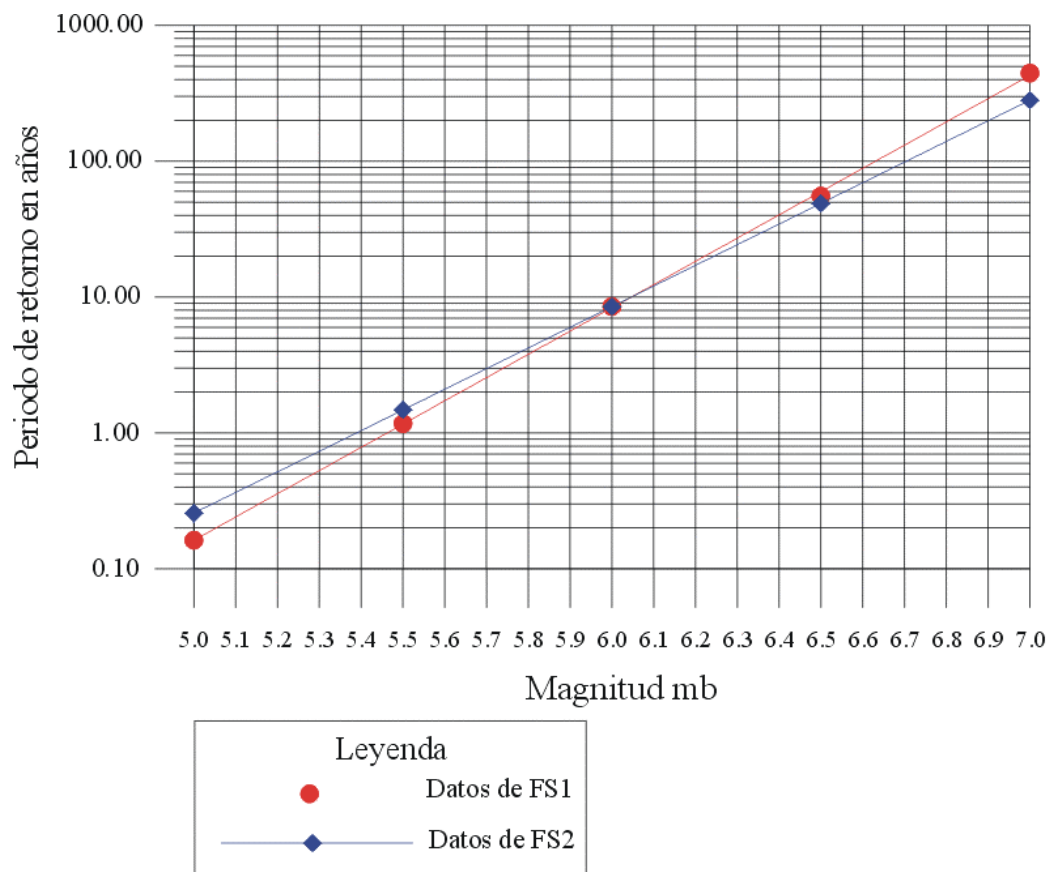


Figura 18. Curvas de periodo de retorno para cada fuente sismogénica

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abe, K. (1979). Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data, *Jour.Geophy.Res.*, **84**, 1561-1568.
- Audebaud, E.H, R. Capdevila, B. Dalmayrac, J. Debelmes, G. Laubacer, C. Lefevre, K. Marocco, C. Martinez, M. Mattauer, F. Megard, J. Paredes y P. Tomasi (1973). Las traits geologique essentials des Andes Centrales (Perou-Bolivie), *Rev.Geogr.Phys.Geol.Dyn.*, **XV**, 11-72.
- Bullen, K.E. y B.A. Bolt (1987). *An Introduction to the Theory of Seismology*, Cambridge, 4° ed., 371-395.
- Boyd, T., A. Snoke, I.S. Sacks y A. Rodriguez (1984). High resolution determination of the Benioff zone geometry beneath southern Peru. *Bull.Seismol.Soc.Am.*, **74**, 557-566.
- Burchfiel, B.C. (1996). Intraplate Tectonics, vía internet http://www.ulib.org/webRoot/Books/National_Academy_Press_Books/cont_tectonics/cont075.htm.
- Chacón, N. (1995). Geomorfología, en *Geología del Perú*, **55**, Serie A: *Carta Geológica Nacional*, 7-14.
- Dorbath, L., A. Cisternas y C. Dorbath (1990). Assessment of the size of large and great historical earthquakes in Peru, *Bull.Seismol.Soc.Ame.*, **80**, 551-576.
- Engdahl, R., R.D. Van Der Hilst y R.P. Buland (1998). Global teleseismic earthquake relocation with improved travel times and procedures for depth determination, *Bull.Seismol.Soc.Am.*, **88**, 722-734.

- Fowler, C.M.R., (1994). *The Solid Earth - An Introduction to Global Geophysics*, Cambridge, USA, 472 pp.
- Grange, F., D. Hatzfeld, P. Cunningham, P. Molnar, S.W. Roecker, G. Suárez, A. Rodríguez y L. Ocola (1984). Tectonic implications of the microearthquakes seismicity and fault plane solutions in southern Peru and their implications, *Jour.Geophy.Res.*, **89**, 6139-6152.
- Gonzales, K. (2000). Métodos de potencial espontáneo aplicado en el volcán Ubinas y métodos geoquímicos aplicados a la vigilancia volcánica y sísmica, *Rev.Trab.Invest.*, IGP, 47-58.
- Gutenberg , B. y C.F. Richter (1956). Magnitude and energy of earthquakes, *Ann. Geofis.* **9**, 1-15.
- Hasegawa, A. e I.S. Sacks (1981). Subduction of the Nazca plate beneath Peru as determined from seismic observations. *Jour.Geophy.Res.*, **86**, 4971-4980.
- Huaco, D. (1986). *Catálogo Sísmico de Perú 1500-1982*, Instituto Geofísico del Perú-Proyecto SISRA, 340 pp.
- Kelleher, J. (1972). Rupture zones of large south american earthquakes and some predictions, *Jour.Geophy.Res.*, **77**, 2087-2103.
- Lamarre, M., B. Townshend y H.C. Shah (1992). Application of the bootstrap method to quantify uncertainty in seismic hazard estimates, *Bull.Seism.Soc.Ame.*, **82**, 104-119.
- Lee, W.H.K. y J.C. Lahr (1972). HYPO71: A computer program for determining hypocenter, magnitude and first motion pattern of local earthquakes, *Open File Report, U.S. Geological Survey*, 100pp.
- Lomnitz, C. (1974). *Global tectonics and earthquake risk*, Elsevier, Amsterdam, 330pp.
- Mercier, J.L, M. Sebrier, A. Lavenu, J. Cabrera, O. Bellier, J.F. Dumont, y J. Machare (1992). Changes in the tectonic regime above a subduction

zone of andean type: The Andes of Peru and Bolivia during the Pliocene-Pleistocene, *Jour.Geophy.Res*, **96**, 11945-11982.

Mogi, K. (1967). Regional variations in magnitude-frequency relation of earthquakes, *Bull.Seism.Soc.Ame.*, **45**, 313-325.

Pacheco, J.F. y L.R. Sykes (1992). Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989, *Bull.Seis.Soc.Ame.*, **82**, 1306-1349.

Sacks, I.S. (1977). Interrelationships between volcanism, seismicity and anelasticity in western South America, *Tectonophysics*, **37**, 131-139.

Schneider, J. F. e I.S. Sacks (1987). Stress in the contorted Nazca plate beneath southern Peru from local earthquakes, *Jour.Geophy.Res.*, **92**, 13887-13902.

Silgado, E. (1975). Magnitud, frecuencia, periodo de retorno de terremotos y riesgo sísmico en la costa del Perú, entre 9° y 13.8° de latitud Sur, *Bol.Soc.Geog.Lima*, **94**, 20-23.

Udiaz, A. y J. Mézcua (1986). *Fundamentos de Geofísica*, Alhambra, España, 201-216.

Utsu, T. (1966). A statistical significance test of the difference in b-value between two earthquake groups, *Jour.Phys.Earth*, **14**, N° 2.

ANEXO 1.

LISTADO DE SISMOS UTILIZADOS

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
26-01-1964	-71.62	-16.36	6.1	116.20	9	9
19-03-1964	-72.98	-15.48	4.7	117.10	22	29
09-04-1964	-71.08	-18.38	5.1	21.00	21	54
19-04-1964	-75.13	-13.78	4.4	85.60	19	41
05-05-1964	-72.76	-18.66	4.9	27.80	3	26
28-05-1964	-74.84	-13.40	5.1	103.50	12	49
21-06-1964	-73.41	-15.29	5.0	95.10	6	54
01-07-1964	-73.25	-14.31	5.3	83.90	22	49
04-07-1964	-72.53	-16.45	5.4	81.00	12	13
10-08-1964	-71.11	-16.76	4.8	99.40	7	34
17-09-1964	-72.94	-15.78	4.9	106.30	7	41
11-10-1964	-71.67	-18.00	4.9	37.40	14	19
11-11-1964	-75.34	-13.68	5.0	81.20	18	48
20-02-1965	-72.71	-18.45	5.0	15.00	21	10
28-03-1965	-72.43	-15.27	4.6	118.30	5	30
28-03-1965	-74.16	-15.93	5.3	67.90	10	0
28-04-1965	-76.15	-14.20	4.2	69.70	9	42
05-05-1965	-75.86	-13.86	4.6	89.20	9	13
10-05-1965	-70.69	-17.33	4.4	107.00	8	35
30-07-1965	-70.82	-18.13	5.3	74.30	5	45
25-08-1965	-69.77	-17.59	4.8	143.50	14	50
19-09-1965	-74.91	-16.33	4.6	29.60	14	17
30-11-1965	-71.29	-18.42	4.4	26.30	9	44
02-12-1965	-69.59	-16.47	4.9	192.20	0	36
14-12-1965	-70.95	-18.34	4.5	71.10	4	55
19-12-1965	-73.50	-14.85	5.0	94.50	20	10
30-12-1965	-71.15	-16.69	5.6	104.00	6	16
04-01-1966	-70.83	-15.31	5.1	178.10	12	48
19-01-1966	-71.35	-17.85	4.9	53.60	4	44
20-01-1966	-75.65	-14.83	4.6	40.30	7	14
09-02-1966	-75.34	-15.39	5.3	40.30	15	13
10-02-1966	-73.73	-16.58	4.6	39.70	10	43
14-02-1966	-75.52	-13.38	4.5	100.60	16	34
02-06-1966	-71.79	-15.71	4.6	136.80	17	5
07-06-1966	-75.89	-14.89	5.5	20.70	0	59
08-06-1966	-76.10	-15.43	4.6	20.10	14	56
10-06-1966	-76.22	-14.87	4.9	21.70	8	13
05-07-1966	-75.87	-15.63	4.6	21.10	23	50
06-07-1966	-75.65	-15.61	4.9	26.70	0	5
31-07-1966	-75.74	-15.75	4.4	19.60	22	18
01-08-1966	-70.65	-17.76	4.7	106.40	9	50

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
29-08-1966	-71.52	-18.48	4.6	35.60	5	48
04-09-1966	-74.13	-17.90	5.0	15.70	5	37
20-09-1966	-75.52	-15.29	4.5	34.20	14	32
17-10-1966	-74.77	-13.63	4.7	102.50	11	11
16-11-1966	-73.08	-17.22	4.5	34.00	17	22
01-12-1966	-73.87	-16.40	4.2	61.90	0	17
09-12-1966	-70.76	-14.73	4.8	220.90	10	6
19-12-1966	-72.00	-16.42	4.9	114.80	2	10
01-02-1967	-72.90	-16.96	4.8	26.30	14	44
09-03-1967	-69.64	-17.59	4.4	153.10	19	57
20-05-1967	-75.26	-16.19	4.6	35.70	6	33
04-06-1967	-75.86	-15.63	4.7	22.50	18	28
14-06-1967	-73.38	-15.01	5.5	97.50	3	14
16-06-1967	-75.81	-15.21	4.6	30.20	10	1
24-06-1967	-73.91	-15.43	4.9	93.90	18	7
03-07-1967	-74.98	-15.99	4.8	15.30	5	28
13-07-1967	-74.79	-15.15	5.2	81.80	14	20
14-07-1967	-72.21	-17.63	5.2	46.20	3	19
03-08-1967	-74.89	-13.68	5.2	108.80	12	40
25-09-1967	-75.38	-15.91	4.6	15.00	4	3
05-10-1967	-75.60	-14.57	5.4	63.30	9	41
22-10-1967	-69.93	-17.14	4.3	155.10	4	40
09-12-1967	-71.06	-17.23	4.7	87.00	9	25
21-12-1967	-72.73	-16.57	5.0	70.20	7	50
11-01-1968	-71.35	-17.18	4.4	83.20	2	43
22-03-1968	-74.77	-13.29	4.3	101.00	3	24
21-04-1968	-72.45	-17.42	4.5	39.10	22	10
26-04-1968	-70.52	-14.45	4.8	210.20	11	54
23-06-1968	-70.30	-15.53	4.2	221.50	11	26
11-08-1968	-73.97	-15.24	5.6	89.70	2	41
28-09-1968	-76.36	-13.17	5.9	68.20	13	53
27-10-1968	-70.17	-17.16	4.7	143.30	14	2
31-10-1968	-73.45	-16.37	5.7	41.60	9	15
04-12-1968	-70.61	-15.77	4.2	200.20	18	4
12-12-1968	-73.84	-15.34	4.9	90.20	23	41
27-12-1968	-69.41	-17.43	4.8	169.40	2	4
12-01-1969	-72.73	-14.08	5.1	92.80	14	12
03-02-1969	-76.11	-15.55	4.5	21.20	6	10
27-02-1969	-74.57	-14.23	5.1	101.40	5	9
15-03-1969	-74.63	-13.64	4.7	109.10	13	6
26-03-1969	-75.76	-15.40	4.7	27.30	1	14

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
21-06-1969	-75.95	-14.97	4.6	24.60	15	52
19-07-1969	-72.41	-17.30	5.8	56.60	4	54
10-08-1969	-74.21	-15.86	4.9	77.30	2	39
27-08-1969	-70.10	-17.47	4.8	140.80	15	55
30-08-1969	-73.45	-14.37	4.8	87.70	16	6
02-09-1969	-71.94	-17.80	5.2	33.10	16	35
21-09-1969	-74.93	-15.94	4.7	30.30	11	28
17-10-1969	-71.51	-14.96	5.1	137.00	8	9
22-10-1969	-71.61	-18.28	5.4	26.70	10	21
22-12-1969	-72.77	-16.92	5.2	54.30	0	6
13-02-1970	-71.69	-16.09	5.4	138.60	17	26
26-02-1970	-74.13	-13.74	4.9	86.60	7	35
26-02-1970	-73.99	-13.70	5.3	92.30	3	3
27-02-1970	-74.86	-16.10	5.1	26.50	14	17
02-03-1970	-73.81	-14.59	4.5	82.40	3	30
03-03-1970	-72.69	-15.06	5.0	106.40	9	15
09-03-1970	-69.60	-16.54	4.5	194.20	13	52
01-04-1970	-75.01	-15.69	5.2	28.40	10	50
06-04-1970	-74.55	-13.73	4.2	106.90	0	56
17-06-1970	-71.83	-16.07	5.8	112.00	4	44
12-07-1970	-69.60	-15.85	4.9	238.20	18	13
30-09-1970	-75.04	-15.28	5.3	62.80	22	56
20-10-1970	-70.18	-15.58	4.7	220.10	16	19
14-12-1970	-73.59	-15.22	4.7	79.20	17	30
21-01-1971	-69.39	-17.37	5.4	170.40	13	23
26-01-1971	-72.77	-15.23	5.1	98.90	5	37
23-05-1971	-72.86	-14.17	5.3	86.60	8	58
01-08-1971	-77.01	-13.04	5.1	51.20	6	12
23-08-1971	-70.16	-17.06	4.8	143.20	1	46
24-09-1971	-73.67	-16.47	5.2	39.20	4	32
06-10-1971	-71.91	-15.15	4.6	132.50	7	52
15-10-1971	-74.16	-15.38	5.0	91.50	2	42
15-10-1971	-73.43	-14.28	5.7	80.00	10	33
21-10-1971	-73.42	-15.55	4.8	104.20	1	57
12-11-1971	-76.55	-13.04	4.8	69.00	0	10
23-01-1972	-76.79	-13.26	4.9	51.20	5	5
29-01-1972	-71.58	-18.01	4.9	38.40	2	18
15-02-1972	-71.31	-17.72	5.8	55.40	21	18
21-02-1972	-71.38	-16.57	5.1	112.10	5	31
29-02-1972	-71.86	-15.07	5.0	128.90	2	4
27-03-1972	-76.31	-14.57	5.2	26.70	12	9

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
04-04-1972	-72.50	-17.21	5.0	55.40	23	33
07-05-1972	-72.36	-17.52	4.7	36.50	11	31
21-05-1972	-73.93	-16.04	5.3	80.20	3	50
05-07-1972	-75.50	-15.86	5.0	22.80	20	21
18-07-1972	-76.48	-14.49	5.0	23.80	21	5
11-08-1972	-73.24	-15.45	5.0	102.00	10	44
06-09-1972	-70.96	-16.95	5.1	98.60	22	49
09-10-1972	-73.33	-15.42	5.0	103.90	16	17
15-01-1973	-75.29	-15.88	4.5	22.90	6	27
16-01-1973	-74.33	-15.78	4.4	75.40	6	31
03-03-1973	-71.39	-14.90	4.4	146.10	6	28
06-03-1973	-71.41	-15.42	5.1	149.60	14	50
06-04-1973	-72.49	-17.19	4.8	51.50	0	51
15-04-1973	-76.19	-14.69	4.9	22.50	23	2
19-05-1973	-74.06	-15.71	5.2	77.40	18	18
30-05-1973	-72.90	-14.18	5.0	83.30	12	39
09-07-1973	-73.89	-16.13	4.6	84.90	5	30
28-07-1973	-71.34	-16.10	5.6	125.60	22	18
29-07-1973	-72.20	-14.38	5.4	91.60	16	15
28-09-1973	-71.32	-18.27	4.3	26.00	14	52
01-10-1973	-73.52	-16.48	4.7	77.60	10	34
09-10-1973	-69.43	-17.33	4.8	174.30	7	41
09-10-1973	-72.79	-17.36	4.8	37.70	17	42
12-10-1973	-74.14	-16.12	5.2	48.20	18	4
03-11-1973	-70.73	-18.04	4.9	68.40	4	34
01-12-1973	-69.91	-17.75	5.3	106.30	14	34
01-02-1974	-75.17	-15.86	5.2	32.30	13	6
02-02-1974	-74.46	-16.11	5.2	80.60	21	9
27-04-1974	-72.16	-15.02	5.7	113.40	6	1
24-07-1974	-71.49	-15.54	4.8	142.70	13	42
26-07-1974	-71.23	-16.44	5.2	111.90	8	59
03-10-1974	-77.38	-13.77	4.7	26.60	19	10
06-10-1974	-74.86	-15.23	4.9	67.20	18	32
10-10-1974	-77.52	-13.07	4.7	24.80	20	57
11-10-1974	-74.34	-16.16	4.8	60.50	17	54
11-10-1974	-74.30	-14.52	5.3	99.80	4	36
26-10-1974	-73.31	-14.96	5.3	105.70	18	53
05-11-1974	-71.75	-16.88	4.5	72.80	23	20
07-11-1974	-70.57	-15.56	5.3	170.50	13	17
23-01-1975	-72.93	-15.46	5.3	106.10	11	4
21-02-1975	-74.06	-14.75	4.9	104.10	20	19

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
12-04-1975	-72.64	-14.86	5.8	97.50	15	33
05-06-1975	-76.07	-13.66	5.5	53.70	3	32
05-06-1975	-69.18	-16.53	5.5	210.50	20	29
12-07-1975	-69.31	-17.31	5.4	151.50	6	47
03-08-1975	-75.02	-15.70	5.4	51.40	11	59
09-08-1975	-72.61	-16.84	5.0	58.80	1	50
06-12-1975	-72.46	-17.04	4.7	75.60	10	23
19-12-1975	-70.56	-17.53	4.7	108.30	22	57
05-01-1976	-74.90	-13.36	5.9	104.20	2	31
29-02-1976	-74.98	-13.30	5.2	102.40	18	1
08-03-1976	-74.48	-15.58	5.0	59.10	8	58
23-03-1976	-75.66	-14.21	4.8	58.20	22	11
01-04-1976	-73.49	-16.54	4.9	68.80	17	17
06-05-1976	-72.23	-14.72	4.6	103.50	13	0
18-05-1976	-72.59	-17.00	5.5	65.40	2	2
28-05-1976	-72.41	-15.46	4.6	126.20	7	30
18-06-1976	-75.49	-15.27	5.7	31.40	14	58
15-08-1976	-73.54	-16.21	4.9	61.80	14	55
17-08-1976	-72.83	-16.02	5.0	100.50	6	2
15-12-1976	-73.72	-15.07	5.0	94.70	2	33
22-12-1976	-70.54	-15.50	4.7	197.00	11	8
16-01-1977	-75.50	-15.87	4.3	14.50	17	15
07-02-1977	-73.44	-16.67	5.1	41.50	21	18
13-03-1977	-69.95	-17.14	5.1	142.70	4	54
05-04-1977	-71.18	-16.88	4.7	106.60	7	34
07-04-1977	-76.42	-15.44	5.2	30.60	20	31
30-04-1977	-75.75	-15.15	5.2	32.80	20	31
02-05-1977	-71.87	-15.30	4.5	128.50	8	31
06-05-1977	-75.13	-15.81	5.0	22.70	12	52
22-07-1977	-70.06	-15.70	4.7	219.10	20	45
10-09-1977	-75.97	-14.21	4.9	49.10	4	39
24-09-1977	-71.34	-18.52	4.7	31.40	0	9
26-10-1977	-72.53	-16.88	5.0	54.00	7	24
31-12-1977	-71.71	-15.42	6.0	143.80	7	53
03-01-1978	-71.95	-17.23	4.9	65.80	7	52
22-01-1978	-73.74	-16.27	5.2	45.90	21	19
10-03-1978	-76.61	-13.34	5.0	53.70	23	41
15-04-1978	-73.43	-16.52	5.3	46.20	13	49
24-04-1978	-76.02	-14.63	5.3	24.90	10	58
16-05-1978	-69.63	-16.85	4.1	197.50	9	0
20-05-1978	-72.04	-17.35	5.1	47.00	9	41

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
24-06-1978	-70.84	-14.97	4.7	182.30	6	37
29-07-1978	-71.87	-15.00	4.3	139.00	1	11
08-08-1978	-70.00	-17.67	4.7	139.00	1	43
01-09-1978	-73.76	-16.49	4.9	44.20	17	55
23-12-1978	-71.64	-14.86	5.1	133.80	14	29
05-01-1979	-75.06	-16.03	4.9	24.20	9	29
06-01-1979	-75.77	-14.46	4.7	56.00	3	6
15-02-1979	-69.85	-16.59	4.6	199.20	20	49
16-02-1979	-72.56	-16.57	6.2	52.60	10	8
07-03-1979	-71.98	-16.12	5.0	125.90	6	21
19-03-1979	-69.42	-15.93	4.6	246.70	12	39
25-04-1979	-72.70	-15.42	4.8	114.00	22	18
21-05-1979	-70.08	-15.49	5.9	231.70	22	22
21-06-1979	-76.10	-15.75	5.3	22.00	1	21
25-06-1979	-71.62	-18.17	4.9	28.20	20	42
03-07-1979	-73.12	-16.71	5.0	73.70	3	0
06-07-1979	-70.35	-15.01	4.7	225.80	13	45
21-08-1979	-74.35	-15.98	5.1	65.10	12	16
08-09-1979	-75.82	-14.33	4.8	61.30	1	13
15-09-1979	-69.52	-15.70	5.5	231.50	10	2
15-10-1979	-76.68	-13.33	5.0	57.90	16	34
04-11-1979	-69.51	-16.82	4.6	180.50	13	58
15-11-1979	-74.81	-16.27	5.1	23.50	13	36
19-12-1979	-71.61	-14.59	5.1	123.70	6	40
26-12-1979	-71.23	-16.16	4.7	141.10	2	2
16-01-1980	-73.37	-14.55	5.7	95.30	15	49
07-03-1980	-72.84	-16.72	5.4	42.90	8	25
12-03-1980	-75.75	-15.26	4.9	49.80	4	27
27-03-1980	-70.12	-17.38	4.5	145.10	6	16
18-04-1980	-71.36	-14.92	5.0	143.40	19	33
18-05-1980	-71.99	-16.33	4.7	105.70	13	42
15-06-1980	-75.19	-15.59	5.3	37.50	23	47
16-06-1980	-75.66	-15.89	4.8	19.10	10	40
23-06-1980	-74.21	-15.89	5.0	45.00	18	35
11-08-1980	-75.19	-15.56	5.1	26.20	19	41
29-09-1980	-70.00	-17.54	5.0	124.90	0	31
05-11-1980	-72.41	-15.89	4.8	105.90	19	24
09-11-1980	-72.75	-16.92	5.1	52.90	14	11
17-12-1980	-72.39	-14.84	4.8	99.10	9	44
02-02-1981	-71.62	-17.30	4.7	71.40	7	20
13-02-1981	-74.47	-15.67	5.6	62.10	19	58

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
14-02-1981	-70.25	-15.59	4.7	219.80	4	28
27-02-1981	-75.81	-15.97	4.7	16.30	9	15
13-03-1981	-70.26	-14.82	5.0	231.90	18	18
28-06-1981	-69.95	-16.29	4.9	202.90	18	30
18-07-1981	-73.90	-17.27	4.4	40.70	18	14
11-08-1981	-72.62	-16.70	5.0	84.00	23	47
26-08-1981	-72.59	-14.09	4.4	100.70	9	56
08-10-1981	-70.34	-17.56	5.1	104.80	22	25
15-10-1981	-71.80	-14.98	5.1	121.30	18	45
24-10-1981	-74.68	-15.75	4.6	22.40	17	1
27-11-1981	-69.68	-17.49	4.9	143.60	17	46
30-11-1981	-69.97	-17.36	5.5	128.90	15	42
19-12-1981	-75.32	-15.18	4.9	60.10	19	24
20-12-1981	-69.96	-17.71	4.5	125.80	6	12
01-04-1982	-71.35	-18.49	5.2	39.80	16	11
16-04-1982	-73.06	-17.07	5.0	43.90	18	5
03-05-1982	-76.12	-13.52	5.3	66.40	3	27
02-06-1982	-73.86	-16.66	4.7	35.70	17	33
02-06-1982	-76.42	-14.06	5.0	39.50	22	47
09-06-1982	-72.07	-15.97	4.3	120.00	22	38
12-06-1982	-73.31	-15.49	4.4	105.50	12	57
11-07-1982	-73.18	-16.75	5.4	26.80	2	13
21-07-1982	-75.05	-13.25	5.1	96.90	22	11
09-08-1982	-71.26	-15.39	4.8	153.30	4	50
16-10-1982	-73.07	-14.30	4.8	78.90	0	12
16-10-1982	-73.77	-16.28	5.0	31.70	11	12
17-10-1982	-73.07	-15.65	5.2	103.00	8	35
14-11-1982	-71.63	-15.18	4.5	135.00	12	55
22-11-1982	-73.47	-16.60	5.0	44.40	4	20
16-12-1982	-70.68	-14.47	5.0	196.10	14	7
25-12-1982	-73.63	-15.51	4.8	104.30	0	2
01-01-1983	-69.28	-17.29	5.6	164.40	5	31
21-02-1983	-76.15	-15.08	5.2	15.20	0	53
27-02-1983	-76.77	-13.43	5.4	23.80	5	5
10-04-1983	-70.65	-17.31	4.5	109.80	11	29
15-05-1983	-73.37	-16.03	5.0	35.00	14	49
26-06-1983	-69.96	-17.79	4.6	112.90	5	39
15-07-1983	-71.59	-17.66	4.8	57.90	20	16
30-07-1983	-75.10	-13.08	4.9	98.30	9	47
18-08-1983	-75.12	-14.98	5.1	67.90	20	15
01-09-1983	-70.02	-17.53	5.9	106.60	20	1

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
24-09-1983	-72.77	-14.11	4.5	97.30	6	5
12-11-1983	-74.12	-15.78	5.2	68.60	13	53
23-11-1983	-75.68	-15.10	5.1	23.90	8	12
29-11-1983	-70.43	-17.51	4.7	102.40	11	45
10-12-1983	-69.94	-17.33	4.5	135.30	4	51
19-12-1983	-74.42	-15.46	5.2	87.30	6	26
04-01-1984	-69.21	-17.18	5.0	181.70	10	10
16-01-1984	-73.22	-16.00	4.5	96.80	6	5
09-02-1984	-76.14	-14.12	5.4	41.20	4	31
26-02-1984	-70.52	-17.37	5.8	110.40	8	18
28-03-1984	-72.80	-15.53	4.9	105.60	13	38
03-04-1984	-73.09	-16.13	5.0	97.00	5	4
08-04-1984	-72.01	-15.74	5.0	123.30	22	35
25-04-1984	-70.87	-17.80	5.0	78.30	11	15
18-06-1984	-72.45	-15.73	5.8	109.60	11	20
27-07-1984	-71.49	-15.69	4.7	145.10	22	53
03-08-1984	-73.57	-16.51	4.9	22.30	9	5
23-08-1984	-72.09	-15.17	4.3	119.90	8	36
26-08-1984	-69.52	-16.22	5.1	210.80	0	22
03-09-1984	-72.47	-14.87	5.0	103.10	17	15
12-09-1984	-71.82	-15.76	5.0	132.90	19	17
20-09-1984	-73.39	-14.99	5.2	103.60	9	53
17-10-1984	-69.53	-16.17	5.0	207.80	0	20
22-10-1984	-72.88	-16.91	4.8	70.30	11	43
10-11-1984	-76.57	-13.22	4.9	60.60	14	47
16-11-1984	-76.07	-13.89	5.4	54.60	6	55
10-12-1984	-75.27	-14.83	5.5	49.50	10	22
14-12-1984	-72.84	-16.79	4.8	64.00	7	58
02-02-1985	-75.54	-15.40	4.8	63.60	5	53
04-02-1985	-74.32	-16.17	4.6	49.80	16	14
07-03-1985	-72.60	-14.07	5.4	86.90	21	8
20-03-1985	-70.61	-18.26	4.9	70.70	15	28
21-03-1985	-73.11	-15.63	4.7	99.40	14	3
26-03-1985	-71.72	-15.21	5.0	122.30	19	28
08-05-1985	-69.99	-17.76	4.6	111.10	1	13
21-05-1985	-75.57	-15.27	4.8	25.00	10	1
30-05-1985	-72.54	-15.46	4.9	124.70	10	43
25-06-1985	-76.50	-13.82	4.6	49.00	23	59
26-06-1985	-73.65	-16.42	4.7	65.70	10	27
10-07-1985	-72.88	-17.41	5.0	24.90	5	50
25-07-1985	-74.03	-15.16	4.6	95.90	5	17

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
13-08-1985	-75.57	-15.12	5.4	23.30	5	29
03-10-1985	-72.72	-15.62	4.7	108.30	15	3
11-11-1985	-72.81	-17.67	4.8	53.30	13	5
01-01-1986	-70.19	-15.33	4.1	210.00	0	24
14-01-1986	-75.59	-14.32	4.8	53.00	16	3
18-03-1986	-72.32	-15.91	4.7	113.40	10	2
28-04-1986	-75.53	-15.06	4.5	55.60	13	43
23-06-1986	-73.36	-14.34	4.6	79.10	10	25
27-06-1986	-73.63	-16.27	5.0	76.40	21	48
20-07-1986	-75.41	-15.94	4.6	31.20	5	52
17-08-1986	-75.74	-14.21	5.2	43.70	11	37
30-11-1986	-70.31	-18.15	4.9	77.50	23	18
05-02-1987	-72.14	-17.04	4.7	100.10	15	36
18-02-1987	-75.94	-14.31	4.9	45.10	17	0
10-03-1987	-72.04	-18.47	5.7	31.90	0	22
13-03-1987	-74.23	-15.59	5.1	93.10	10	28
04-04-1987	-75.47	-14.75	5.0	56.20	12	12
04-04-1987	-70.81	-14.53	5.1	186.00	0	17
27-06-1987	-75.94	-14.09	5.9	59.90	9	9
13-07-1987	-70.07	-15.33	5.2	234.10	19	14
17-07-1987	-74.07	-15.53	5.2	75.40	21	2
19-07-1987	-70.42	-17.34	5.2	108.00	14	0
26-07-1987	-76.07	-14.15	4.9	42.60	20	11
27-07-1987	-75.57	-14.75	4.9	48.00	11	19
19-09-1987	-75.68	-14.98	5.1	24.40	9	21
02-10-1987	-71.66	-16.20	4.6	124.90	2	35
28-10-1987	-77.11	-13.20	5.0	32.50	17	44
16-12-1987	-69.75	-16.80	4.8	187.10	3	26
27-12-1987	-72.86	-16.76	4.8	79.70	20	37
05-01-1988	-74.02	-16.56	4.6	60.40	8	54
22-01-1988	-70.51	-15.28	4.9	194.30	5	28
15-02-1988	-76.36	-13.43	5.0	67.70	18	44
09-03-1988	-74.16	-17.35	6.0	19.10	21	33
14-03-1988	-73.49	-14.58	5.1	103.60	10	32
12-04-1988	-72.29	-17.30	6.1	32.10	23	19
06-05-1988	-76.19	-13.35	5.9	54.10	16	34
20-06-1988	-75.62	-15.37	4.7	21.20	6	9
04-07-1988	-71.80	-17.73	5.8	15.00	13	54
07-07-1988	-73.01	-16.61	5.1	57.50	21	45
01-09-1988	-69.47	-16.78	4.8	181.00	5	36
08-10-1988	-71.42	-17.01	4.5	85.80	23	39

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
06-12-1988	-73.12	-17.79	4.9	26.20	0	18
05-02-1989	-70.20	-17.28	5.0	125.40	13	55
17-02-1989	-72.60	-17.56	5.3	20.00	15	12
27-02-1989	-69.83	-17.73	5.0	145.40	21	7
26-03-1989	-73.95	-14.81	5.3	103.90	6	39
29-03-1989	-72.42	-18.47	5.2	20.80	4	6
27-06-1989	-75.14	-15.93	4.7	30.00	8	10
27-08-1989	-70.50	-17.66	5.0	109.00	12	41
22-09-1989	-69.47	-16.70	4.6	204.40	15	43
09-11-1989	-72.64	-15.37	4.9	122.30	4	15
29-11-1989	-73.17	-15.83	6.0	73.10	1	0
07-01-1990	-74.17	-16.02	5.8	46.70	9	6
27-01-1990	-69.88	-16.37	4.8	184.10	9	10
09-02-1990	-75.67	-15.07	5.4	26.70	17	9
10-02-1990	-71.24	-18.72	5.0	46.80	2	46
16-03-1990	-76.96	-13.42	5.0	31.00	2	1
25-03-1990	-70.63	-15.03	4.5	210.40	12	21
04-04-1990	-72.99	-16.23	5.3	77.60	5	47
08-04-1990	-69.64	-17.61	4.7	154.40	5	43
20-04-1990	-71.42	-14.91	4.9	136.00	18	23
30-04-1990	-76.72	-13.34	4.6	37.60	22	18
30-04-1990	-72.77	-17.34	5.0	33.20	1	39
02-05-1990	-71.87	-14.87	4.4	127.90	18	50
08-06-1990	-71.81	-17.63	5.6	26.70	13	49
10-07-1990	-75.58	-15.75	5.0	21.50	21	51
23-09-1990	-72.85	-15.96	4.8	106.40	11	1
17-10-1990	-71.43	-16.91	5.0	97.60	23	24
21-10-1990	-69.38	-17.30	4.8	174.80	3	43
30-10-1990	-70.32	-17.61	4.4	113.40	1	1
04-11-1990	-72.58	-15.73	5.3	123.10	18	13
19-12-1990	-73.06	-16.68	5.0	92.40	17	1
29-01-1991	-75.68	-15.02	5.2	37.70	16	4
08-02-1991	-76.31	-14.50	4.7	42.30	14	17
05-04-1991	-75.51	-14.25	5.7	51.20	15	50
08-05-1991	-74.39	-13.82	5.6	103.40	19	53
24-05-1991	-70.71	-16.58	6.3	121.20	20	50
14-06-1991	-69.55	-15.63	4.1	247.70	19	23
01-07-1991	-74.91	-15.90	5.4	41.70	13	32
24-07-1991	-73.73	-16.03	4.9	55.60	3	27
29-07-1991	-73.88	-14.22	5.4	92.40	13	52
08-08-1991	-77.28	-13.41	4.8	37.70	16	2

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
19-08-1991	-75.49	-16.35	4.8	21.90	2	41
27-08-1991	-73.27	-16.28	5.1	73.60	11	46
02-12-1991	-69.34	-15.99	5.1	234.80	17	27
15-12-1991	-70.36	-17.57	5.6	99.50	18	56
10-01-1992	-76.49	-13.31	4.9	52.70	7	3
21-02-1992	-73.78	-14.37	4.5	82.00	4	52
30-03-1992	-70.85	-14.82	4.4	174.80	0	27
15-04-1992	-76.24	-14.45	4.7	28.50	23	40
06-05-1992	-72.12	-17.32	4.8	52.90	23	29
16-05-1992	-76.04	-13.61	5.6	58.00	20	58
01-06-1992	-70.72	-17.57	4.8	80.30	1	47
10-07-1992	-75.67	-14.51	4.2	50.00	6	8
18-07-1992	-74.02	-15.67	4.4	47.20	1	33
22-08-1992	-70.80	-15.60	4.8	164.80	7	35
27-11-1992	-76.58	-13.33	4.7	56.80	20	49
14-12-1992	-73.68	-16.54	5.0	39.20	12	49
28-01-1993	-71.80	-16.27	4.6	110.30	15	6
23-03-1993	-70.62	-15.51	4.5	201.50	23	13
07-04-1993	-75.28	-13.93	4.4	86.90	1	30
18-05-1993	-70.91	-15.39	4.4	177.10	21	4
17-06-1993	-69.47	-17.48	4.6	156.70	20	5
27-06-1993	-72.54	-15.99	4.4	114.40	5	22
07-07-1993	-72.85	-17.25	4.4	40.80	11	24
24-07-1993	-71.85	-15.30	4.5	132.70	17	54
07-10-1993	-75.83	-14.14	5.4	46.30	16	35
13-11-1993	-70.78	-16.48	5.3	100.00	12	30
17-12-1993	-74.40	-15.14	4.6	79.70	8	49
09-01-1994	-69.65	-16.94	4.9	159.20	12	43
29-01-1994	-75.03	-13.22	4.9	97.10	12	56
06-02-1994	-69.17	-17.19	4.9	168.40	10	20
11-02-1994	-71.05	-18.71	5.2	40.70	0	48
20-04-1994	-70.52	-15.19	5.0	203.70	2	59
25-04-1994	-76.00	-14.77	4.6	39.20	18	50
07-05-1994	-75.32	-13.72	4.8	117.90	0	31
24-05-1994	-74.79	-15.73	5.6	36.70	2	5
16-06-1994	-72.91	-14.77	4.6	119.80	11	28
16-06-1994	-70.30	-15.38	5.6	195.80	18	41
09-07-1994	-73.01	-16.67	5.0	66.10	3	47
14-07-1994	-73.50	-16.18	4.8	32.00	22	9
08-09-1994	-70.16	-15.34	4.5	218.60	9	36
27-10-1994	-75.32	-15.04	5.1	43.70	23	46

FECHA	LON	LAT	MAG (mb)	PROF. (km)	HH	MM
-------	-----	-----	-------------	---------------	----	----

11-11-1994	-72.47	-15.64	5.6	115.20	8	48
06-12-1994	-75.28	-15.36	5.3	28.50	9	6
12-12-1994	-69.59	-17.56	5.9	143.20	7	41
03-01-1995	-69.96	-15.37	4.2	236.00	10	7
10-01-1995	-69.64	-17.65	4.6	140.00	23	8
10-01-1995	-69.37	-16.61	5.1	182.70	11	3
27-01-1995	-69.39	-17.46	4.7	170.30	5	50
29-01-1995	-71.47	-15.13	4.4	143.60	22	51
09-02-1995	-75.09	-15.96	4.9	39.10	12	59
22-02-1995	-73.26	-15.83	5.2	103.30	0	5
28-02-1995	-70.24	-14.85	4.7	226.60	11	56
20-03-1995	-73.54	-16.46	4.4	31.00	15	35
25-03-1995	-74.83	-16.01	4.9	55.70	1	13
14-04-1995	-70.51	-15.27	5.2	205.60	4	31
15-04-1995	-72.81	-13.99	4.1	97.10	5	9
27-06-1995	-74.88	-15.26	4.1	50.40	13	32
08-07-1995	-69.36	-17.18	4.4	173.30	10	9
13-07-1995	-71.44	-18.05	4.0	25.00	12	59
10-08-1995	-75.80	-14.35	4.7	60.20	15	55
20-08-1995	-73.57	-16.40	4.4	71.20	19	43
21-08-1995	-72.80	-16.97	4.7	44.90	23	9
25-08-1995	-75.04	-15.87	4.0	38.00	2	5
31-08-1995	-71.37	-16.69	4.4	97.20	10	19
01-09-1995	-74.83	-13.56	5.1	103.60	5	18
03-09-1995	-72.14	-15.89	4.7	118.40	7	31
04-09-1995	-74.65	-16.11	4.1	61.20	12	30
07-09-1995	-72.20	-16.12	4.4	106.60	1	25
09-09-1995	-71.77	-16.79	4.6	97.60	22	15
05-10-1995	-72.34	-16.03	5.0	113.60	8	18
11-10-1995	-71.66	-14.69	4.1	149.10	3	52
25-10-1995	-71.81	-17.10	4.5	94.20	20	57
18-11-1995	-75.30	-13.13	4.5	102.20	17	9
10-12-1995	-76.18	-13.79	4.6	52.00	16	12
22-12-1995	-72.15	-15.11	4.2	96.10	23	58
22-12-1995	-69.12	-15.77	4.9	241.10	22	54
31-12-1995	-75.70	-15.09	4.7	23.70	1	12

ANEXO 2.

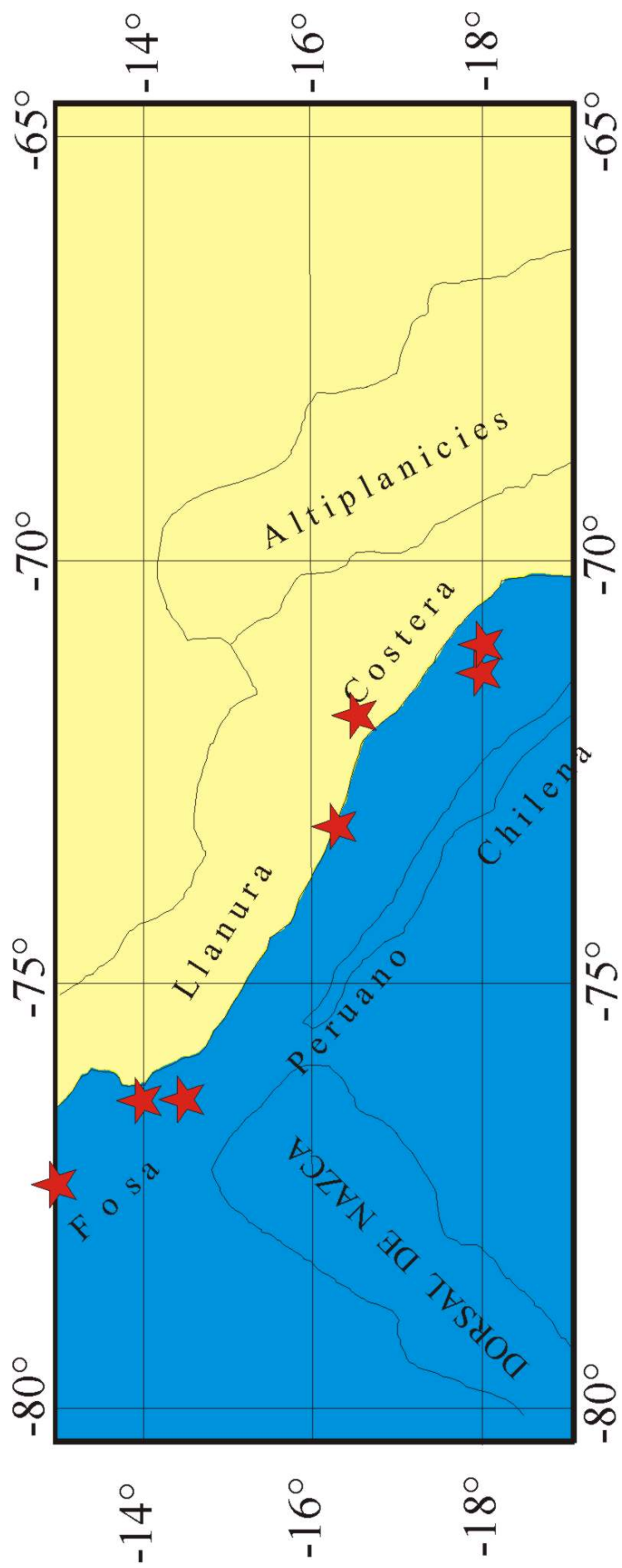
SISMOS HISTORICOS

SISMOS HISTORICOS

Sismos con magnitudes superiores a 7,8 Ms ocurridos en la región de estudio, datos tomados de Huaco (1986) y de Silgado (1978)

Fecha	Latitud	Longitud	Mw	Ms	Intensidad (MM)	Longitud de ruptura (kilómetros)*
1582-01-22	-16.30	-73.30	7.5	7.9	X Arequipa	
1604-11-24	-18.00	-71.50	8.7	8.4	IX Arequipa	450
1664-05-12	-14.00	-76.00	7.5	7.8	X Ica	
1687-10-20	-15.20	-75.90	7.8	7.6		100-150
1784-05-13	-16.50	-72.00	7.8	8.4	X Arequipa	300
1868-08-13	-18.00	-71.00	8.8	8.5	X-XI Arequipa	500
1942-08-24	-15.00	-76.00	7.7	8.4	IX Nazca	

*Fuente Dorbath et al. (1990)



Distribución epicentral de los sismos históricos con magnitudes superiores a 7,8 M_s

ANEXO 3.

DATOS UTILIZADOS EN LOS GRAFICOS DE
GUTENBERG-RICHTER Y VALORES
EXTREMOS.

DATOS UTILIZADOS PARA EL GRÁFICO GUTENBERG-RICHTER
EN LA FUENTE SISMOGÉNICA 1

Magnitud (m_b)	N*	Sumatoria de N
4.2	3	260
4.3	2	257
4.4	6	255
4.5	11	249
4.6	22	238
4.7	27	216
4.8	25	189
4.9	36	164
5.0	37	128
5.1	16	91
5.2	24	75
5.3	13	51
5.4	12	38
5.5	6	26
5.6	6	20
5.7	3	14
5.8	4	11
5.9	3	7
6.0	2	4
6.1	1	2
6.2	1	1

* N es la frecuencia de sismos de magnitud m_b

DATOS UTILIZADOS PARA EL GRÁFICO GUTENBERG-RICHTER
EN LA FUENTE SISMOGÉNICA 2

Magnitud (m_b)	N*	Sumatoria de N
4.1	3	230
4.2	4	227
4.3	8	223
4.4	12	215
4.5	15	203
4.6	19	188
4.7	30	169
4.8	24	139
4.9	20	115
5.0	26	95
5.1	20	69
5.2	8	49
5.3	10	41
5.4	5	31
5.5	4	26
5.6	8	22
5.7	3	14
5.8	4	11
5.9	4	7
6.0	1	3
6.1	1	2
6.2	0	1
6.3	1	1

*N es la frecuencia de sismos de magnitud m_b

DATOS UTILIZADOS PARA EL GRÁFICO DE VALORES
EXTREMOS
EN LA FUENTE SISMOGÉNICA 1

j	m_b	$G(m_b)$	$\ln(G(m_b))$	$\ln(-\ln(G(m_b)))$
1	4.9	0.03125	-3.4657	1.2429
2	5.2	0.06250	-2.7726	1.0198
3	5.2	0.09375	-2.3671	0.8617
4	5.2	0.12500	-2.0794	0.7321
5	5.2	0.15625	-1.8563	0.6186
6	5.2	0.18750	-1.6740	0.5152
7	5.3	0.21875	-1.5198	0.4186
8	5.3	0.25000	-1.3863	0.3266
9	5.3	0.28125	-1.2685	0.2378
10	5.3	0.31250	-1.1632	0.1511
11	5.4	0.34375	-1.0678	0.0656
12	5.4	0.37500	-0.9808	-0.0194
13	5.4	0.40625	-0.9008	-0.1045
14	5.4	0.43750	-0.8267	-0.1903
15	5.4	0.46875	-0.7577	-0.2775
16	5.5	0.50000	-0.6932	-0.3665
17	5.5	0.53125	-0.6325	-0.4580
18	5.5	0.56250	-0.5754	-0.5528
19	5.5	0.59375	-0.5213	-0.6514
20	5.6	0.62500	-0.4700	-0.7550
21	5.6	0.65625	-0.4212	-0.8646
22	5.6	0.68750	-0.3747	-0.9817
23	5.7	0.71875	-0.3302	-1.1079
24	5.7	0.75000	-0.2877	-1.2459
25	5.8	0.78125	-0.2469	-1.3989
26	5.8	0.81250	-0.2076	-1.5720
27	5.9	0.84375	-0.1699	-1.7726
28	5.9	0.87500	-0.1335	-2.0134
29	6.0	0.90625	-0.0984	-2.3183
30	6.1	0.93750	-0.0645	-2.7405
31	6.2	0.96875	-0.0318	-3.4499

DATOS UTILIZADOS PARA EL GRÁFICO DE VALORES
EXTREMOS
EN LA FUENTE SISMOGÉNICA 2

j	m_b	$G(m_b)$	$\ln(G(m_b))$	$\ln(-\ln(G(m_b)))$
1	4.7	0.03030	-3.49661	1.25179
2	4.8	0.06061	-2.80330	1.03080
3	5.0	0.09091	-2.39789	0.87459
4	5.0	0.12121	-2.11023	0.74680
5	5.1	0.15152	-1.88704	0.63501
6	5.1	0.18182	-1.70474	0.53341
7	5.1	0.21212	-1.55060	0.43864
8	5.1	0.24242	-1.41708	0.34860
9	5.1	0.27273	-1.29927	0.26180
10	5.2	0.30303	-1.19392	0.17724
11	5.2	0.33333	-1.09862	0.09406
12	5.2	0.36364	-1.01159	0.01152
13	5.3	0.39394	-0.93156	-0.07090
14	5.3	0.42424	-0.85746	-0.15379
15	5.3	0.45454	-0.78847	-0.23766
16	5.5	0.48485	-0.72392	-0.32308
17	5.5	0.51512	-0.66336	-0.41044
18	5.6	0.54545	-0.60614	-0.50064
19	5.6	0.57576	-0.55206	-0.59409
20	5.6	0.60606	-0.50078	-0.69160
21	5.7	0.63636	-0.45199	-0.79409
22	5.7	0.66667	-0.40546	-0.90273
23	5.8	0.69697	-0.36101	-1.01884
24	5.8	0.72727	-0.31846	-1.14427
25	5.8	0.75758	-0.27763	-1.28148
26	5.9	0.78788	-0.23841	-1.43377
27	5.9	0.81818	-0.20067	-1.60608
28	5.9	0.84848	-0.16431	-1.80601
29	5.9	0.87879	-0.12921	-2.04632
30	6.0	0.90909	-0.09531	-2.35061
31	6.1	0.93939	-0.06252	-2.77220
32	6.3	0.96969	-0.03078	-3.48093